

**Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
федеральное государственное автономное образовательное учреждение
высшего образования
«НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
ТОМСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»**

На правах рукописи

Клепиков Дмитрий Михайлович

**ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ТЕПЛООБМЕНА
НА СТРУКТУРИРОВАННЫХ ПОВЕРХНОСТЯХ**

1.3.14 – Теплофизика и теоретическая теплотехника
Диссертация на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Научный руководитель:
доктор технических наук, доцент
Глушков Дмитрий Олегович

Томск – 2026

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	5
ГЛАВА 1. СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ ИССЛЕДОВАНИЙ ТЕПЛООБМЕНА ПРИ ИСПАРЕНИИ КАПЕЛЬ НА СТРУКТУРИРОВАННЫХ ПОВЕРХНОСТЯХ	17
1.1 LIS-поверхности: принципы создания, свойства и перспективы применения в теплоэнергетическом оборудовании	19
1.2 Бифильные поверхности	22
1.3 Влияние смачиваемости и шероховатости поверхности на гидродинамические режимы взаимодействия капли с нагретой стенкой. «Термическое» и «вторичное» распыление капель.	25
1.4 Критерии и методики оценки эффективности охлаждения поверхностей за счет испарения капель теплоносителей	30
1.5 Нерешённые вопросы, определяющие актуальность настоящего исследования. Выводы по первой главе.	33
ГЛАВА 2. МЕТОДЫ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ МЕТОДИКИ ИССЛЕДОВАНИЯ ПРОЦЕССА ИСПАРЕНИЯ КАПЛИ И ТЕПЛООТВОДА.....	36
2.1 Методы и методики исследования «термического» распыления капель воды на полированных и структурированных поверхностях и «вторичного» распыления на LIS	37
2.1.1 Изготовление супергидрофильных и супергидрофобных, LIS поверхностей.....	37
2.1.2 Определение смачиваемости, анализ микроструктуры и шероховатости.....	40
2.1.3 Методы и методики определения поверхностного натяжения и их составляющих	41
2.1.4 Экспериментальный стенд для исследования процессов распада капель теплоносителя по механизмам «термического» и «вторичного» распыления	43
2.2 Методы и методики исследования структурированных поверхностей с контрастным смачиванием	47
2.2.1 Создание поверхностей с контролируемым контрастом смачивания	47

2.2.2	Контроль однородности шероховатости при независимом изменении смачиваемости.....	53
2.2.3	Экспериментальный стенд для изучения процесса испарения капель на структурированных поверхностях	54
2.2.4	Методика PIV (Particle Image Velocimetry) для измерения скоростей внутренних течений в капле	57
2.2.5	Методика PLIF (Planar Laser-Induced Fluorescence) для определения температурных полей в капле.....	59
2.2.6	Графоаналитический подход к оценке длины линии трёхфазного контакта.....	63
	Выводы по второй главе	64
ГЛАВА 3. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ АНАЛИЗ.....		66
3.1	Результаты исследования эффективности охлаждения поверхностей теплообмена за счет испарения капли теплоносителя при её распаде по механизмам «термического» и «вторичного» распыления.....	67
3.1.1	Анализ текстуры и механизмов взаимодействия капли теплоносителя с LIS-поверхностями	67
3.1.2	Оценка эффективности охлаждения при «термическом» и «вторичном» распылении капли теплоносителя.....	75
3.2	Результаты исследования испарения капли, расположенной на структурированных поверхностях с контрастным смачиванием.....	89
3.2.1	Анализ однородности текстуры при локальном изменении смачиваемости.....	89
3.2.2	Режимы испарения на бифильных поверхностях: особенности по сравнению с полированными поверхностями и поверхностями с экстремальным смачиванием.....	102
3.2.3	Внутренние конвективные течения в капле, усиление термокапиллярной конвекции.....	110
3.2.4	Температурные поля в капле, неоднородность, связь с пространственным распределением смачиваемости.....	122

3.2.5 Оценка термокапиллярного течения (Марангони) и релеевской конвекции.....	126
3.2.6 Оценка влияния приповерхностных свойств поверхностей теплообмена на эффективность охлаждения	129
Выводы по третьей главе.....	143
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	148
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.....	151
ПРИЛОЖЕНИЕ А Ноу-хау	168
ПРИЛОЖЕНИЕ Б Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ.....	169
ПРИЛОЖЕНИЕ В Акт о внедрении.....	170
ПРИЛОЖЕНИЕ Г Акт об использовании	171

ВВЕДЕНИЕ

Тепловыделение современных микроэлектронных компонентов (процессоры, силовые модули) и компактных энергетических систем достигает 100–500 Вт/см² [1], а в отдельных случаях превышает 1000 Вт/см² [2,3]. Широко используемые системы охлаждения, основанные на принудительной конвекции однофазных теплоносителей и использующие теплообменные поверхности с гладкой микроструктурой, исчерпывают свой потенциал при тепловых нагрузках выше 100 Вт/см² [4].

Наиболее перспективными решениями обеспечения регламентированного режима работы энергонасыщенного оборудования с тепловыделением более 100 Вт/см² являются системы охлаждения с фазовым переходом (спрейные технологии) [5], где испарение отдельных капель на нагретой поверхности обеспечивает более эффективный теплоотвод. Однако широкое промышленное внедрение этих технологий остаётся ограниченным. Во-первых, отсутствуют универсальные теоретические модели, позволяющие прогнозировать характеристики испарения капель. Процесс определяется сложной взаимосвязью большого числа параметров: диаметра капель, теплофизических свойств теплоносителя, кинематики распыления (скорость удара, угол падения, частота подачи) и свойств охлаждаемой поверхности (теплопроводность, микротекстура, химический состав, смачивание). Во-вторых, существуют технологические и надёжностные ограничения. Даже незначительные загрязнения теплоносителя (частицы размером >1 мкм) вызывают засорение микросопел распылительных головок, что приводит к неравномерности орошения и локальному перегреву компонентов. На поверхностях с традиционной механической обработкой (шлифовка, полировка) происходит слияние капель и формирование сплошной паровой плёнки (плёночное кипение), что существенно снижает интенсивность теплоотдачи по сравнению с режимом капельного испарения. Переход к плёночному режиму обусловлен недостаточной контролируемостью

смачиваемости и отсутствием устойчивых микроструктур, способных удерживать капли в диспергированном состоянии.

Развитие не только микроэлектроники, но и практически всех электрофизических систем от силовой преобразовательной техники до компактных источников энергии сопровождается ростом удельных тепловых нагрузок [1]. Несмотря на существующие нерешенные задачи, системы с фазовым переходом теплоносителя остаются наиболее перспективным направлением для обеспечения регламентированного температурного режима при тепловых нагрузках свыше 100 Вт/см^2 [4]. Систематическое решение обозначенных задач будет способствовать массовому внедрению этих технологий в важнейших отраслях промышленности.

Объектом исследования являются структурированные поверхности теплообмена с развитой многомодальной шероховатостью и пространственным распределением зон с контрастной смачиваемостью.

Предметом исследования являются процессы тепломассопереноса, протекающие при испарении капли жидкости, расположенной на структурированной поверхности теплообмена.

Степень разработанности темы.

По результатам анализа современного состояния отечественных и зарубежных исследований в области теплообмена при испарении капель на структурированных поверхностях можно выделить следующие основные направления работ мирового научного сообщества: создание и исследование поверхностей с гомогенной смачиваемостью (направление включает разработку и изучение супергидрофильных и супергидрофобных поверхностей, основное внимание уделяется влиянию микро- и наноструктурирования на смачиваемость, состояния капли – Кэсси-Бакстера и Венцеля); создание и исследование поверхностей с гетерогенной (контрастной) смачиваемостью (бифильные поверхности), направление, наиболее близкое к тематике диссертации, изучается влияние контраста смачиваемости на растекание и испарение капель; разработка и применение нового класса поверхностей, наполненных углеводородной смазкой

(LIS); изучение гидродинамических режимов взаимодействия капли с нагретой стенкой; численное моделирование сопряженных задач теплообмена для прогностической оценки характеристик испарения капель. Наиболее значимые результаты получены известными специалистами: В.В. Терехов, О.А. Кабов, И.В. Марчук, Д.В. Зайцев, Е.Я. Гатапова, И.С. Войнов, А.Н. Рожкова, С.В. Старинский, А.С. Суртаев, I. Mudawar, M. Može, M. Zupančič, P. Gregorčič, H.J. Kwak, D.E. Kim, M.H. Kim, James Sprittles, M.M. Rahman, A. Jaikumar, S.G. Kandlikar, A.R. Betz.

Несмотря на значительный объем накопленных данных в области теплообмена при испарении капель на структурированных поверхностях, остается ряд нерешенных проблем, определяющих актуальность дальнейших исследований. Отсутствуют универсальные теоретические модели. Существующие модели не позволяют с высокой достоверностью прогнозировать характеристики испарения капель на сложных гетерогенных поверхностях из-за многофакторной зависимости процесса (вида текстуры, элементного состава и шероховатости поверхности, кинематики капли, теплофизических свойств теплоносителя). Недостаточная изученность локальных механизмов теплопереноса. На бифильных поверхностях изучено фрагментарно влияние гидродинамических и термокапиллярных процессов (конвекции Марангони) на распределение температуры и интенсивность теплоотвода внутри капли. Требуется количественная оценка вклада внутренних течений в интегральную эффективность охлаждения. Не изучена роль пространственного распределения смачиваемости поверхностей на эффективность охлаждения за счет испарения капли теплоносителя. Не исследованы температурные диапазоны устойчивой работы (отвода теплоты) за счет испарения капли теплоносителя на различных типах структурированных поверхностей (особенно LIS и бифильных) в условиях, предшествующих кризису теплообмена.

Цель диссертационной работы – интенсификация теплоотвода от поверхностей нагрева при испарении капель теплоносителя в широком диапазоне температур за счет структурирования этих поверхностей путем формирования

развитой многомодальной шероховатости и пространственного распределения зон с контрастной смачиваемостью.

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

1. Исследована эффективность теплоотвода и установлены механизмы распада капель воды в режимах «термического» и «вторичного» распыления на различных типах поверхностей (полированная, супергидрофильная, супергидрофобная, LIS) в диапазоне температур 80–300 °С.

2. Разработан и экспериментально реализован подход структурирования поверхностей металлов и их сплавов, позволяющий независимо контролировать формирование многомодальной шероховатости и смачиваемости для отдельного изучения их влияния на гидродинамику и теплообмен при испарении капель жидкости.

3. Исследованы особенности фазового перехода и гидродинамические режимы испарения капель воды на бифильных поверхностях с контрастным смачиванием (гидрофильные/супергидрофильные и супергидрофобные/супергидрофильные зоны).

4. Для капли воды с использованием экспериментальных методов PIV и PLIF оценен вклад внутренних конвективных течений, термокапиллярной и термогравитационной конвекции в интенсивность теплоотвода за счет ее испарения на структурированных поверхностях с контрастным смачиванием.

5. Определено соотношение площадей зон с контрастной смачиваемостью, способствующее улучшению теплоотвода от теплонагруженной поверхности, и оценена эффективность теплообмена разработанных структурированных поверхностей по сравнению с широко применяемыми аналогами.

6. Установлены температурные диапазоны эффективной работы различных типов структурированных поверхностей и разработаны практические рекомендации по их применению в системах охлаждения теплонагруженного оборудования.

Соответствие диссертации Паспорту научной специальности.
Диссертация соответствует паспорту специальности 1.3.14. Теплофизика и

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

Научная новизна.

Для преодоления принципиального ограничения широко применяемых методов исследования (ИК-термография, контактные датчики на поверхности или под поверхностью), не позволяющих оценить теплообмен в объеме материала, разработана методика с использованием встроенных прецизионных микротермопар. Ее применение позволило экспериментально зарегистрировать и проанализировать динамику локального охлаждения образца поверхности нагрева на заданной глубине под испаряющейся каплей, установив связь между характеристиками структурированной поверхности и эффективностью охлаждения.

Установлены и сопоставлены различия в эффективности теплообмена и физических механизмах «термического» и «вторичного» распыления капель на поверхностях теплообмена (полированных, супергидрофильных, супергидрофобных, LIS) в широком диапазоне температур (80–300 °С). Изучены процессы испарения капель на LIS-поверхностях с различными смазками (масло, ПЭФ-350). «Термическое» распыление обусловлено разрушением паровых пузырей на границе «капля – твёрдая поверхность», «вторичное» распыление – разрушением паровых пузырей на границе раздела несмешивающихся жидкостей («вода–смазка LIS»). На LIS-поверхностях доминирует вторичное распыление, а режимы «танца» [6–8] и «отскока» капли подавляются. «Вторичное» распыление на LIS требует взаимной нерастворимости теплоносителя и смазки, а также преобладания полярной составляющей в поверхностном натяжении

теплоносителя и дисперсионной составляющей в поверхностном натяжении смазки.

Разработан и экспериментально реализован новый подход модификации теплообменных поверхностей из алюминиево-магниевого сплава, позволяющий независимо контролировать шероховатость и смачиваемость. Суть подхода заключается в последовательном применении лазерной абляции наносекундным излучением для формирования многомодальной шероховатости, модификации химического состава приповерхностного слоя термолизом углеводородсодержащих жидкостей (для гидрофобизации) и локальным лазерным нагревом до 300–350 °С (для гидрофилизации) без изменения шероховатости поверхности. Проведена оценка влияния шероховатости и смачиваемости как независимых факторов на процессы тепло- и массообмена при испарении капель. Созданы принципиально новые типы структурированных поверхностей с заданным соотношением площадей зон экстремальной смачиваемости (от 13 % до 54 %) и идентичной микротекстурой, что позволило выявить диапазон гидрофобизации (30–45 %), обеспечивающий наилучший теплоотвод, и установить нелинейную зависимость эффективности охлаждения от пространственного распределения смачивания.

Доказано, что удельная скорость испарения капли жидкости не является однозначным критерием эффективности теплоотвода от поверхности нагрева. На структурированных бифильных поверхностях снижение интегральной скорости испарения компенсируется локальной интенсификацией теплообмена в зонах контрастного смачивания. Интенсификация теплообмена на бифильных поверхностях с комбинацией супергидрофильных/супергидрофобных свойств обусловлена увеличением протяжённости линии трехфазного контакта и усилением термокапиллярной конвекции. Установлено, что бифильные поверхности с комбинацией гидрофильных/супергидрофильных зон обеспечивают до 20-ти кратного увеличения эффективности охлаждения при температурах до 200 °С по сравнению с полированными поверхностями.

Супергидрофобные и поверхности с экстремальным контрастом смачивания расширяют диапазон эффективного охлаждения до 180–260 °С.

Теоретическая значимость работы заключается в развитии фундаментальных знаний о механизмах тепломассопереноса при фазовых переходах и распылении капель на структурированных поверхностях. Полученные результаты расширяют представления о физике процессов «термического» и «вторичного» распыления, устанавливая критерии их реализации в зависимости от свойств поверхности (шероховатость, смачиваемость), наличия смазочного слоя, составляющих в поверхностном натяжении теплоносителя, смазочного слоя и температурного режима. Работа вносит вклад в гидродинамику взаимодействия капель с нагретыми стенками, детализируя роль трехфазной линии контакта и термокапиллярной конвекции. Работа вносит методологический вклад в экспериментальную теплофизику. Разработан и апробирован оригинальный подход, сочетающий методы PIV и PLIF с высокоточной локальной термометрией в приповерхностном слое. Это является новым инструментом для пространственно-временного анализа полей скорости и температуры в динамически изменяющихся системах с фазовым переходом. Впервые экспериментально доказано, что эффективность охлаждения не определяется однозначно интегральной скоростью испарения, а зависит от локальной интенсификации теплообмена, обусловленной пространственным распределением смачиваемости. Это пересматривает существующие критерии оценки эффективности капельного охлаждения и формирует новые направления для математического моделирования.

Практическая значимость работы заключается в создании научно-технических решений для повышения эффективности систем охлаждения энергонасыщенного оборудования. Разработан и экспериментально реализован подход создания бифильных структурированных поверхностей теплообмена. Обоснован выбор типа структурированных поверхностей теплообмена для различных температурных режимов. Для температурного диапазона до 200 °С рекомендованы поверхности с комбинацией гидрофильных и супергидрофильных

зон, обеспечивающие до 20-ти кратного повышения эффективности охлаждения по сравнению с полированными аналогами. Для высокотемпературного диапазона 200–260 °С установлена высокая эффективность супергидрофобных и структурированных поверхностей с экстремальным контрастом смачивания, расширяющих рабочий диапазон температур нагрева и превосходящих полированные поверхности до 6 раз.

Результаты работы являются основой для разработки систем капельного охлаждения высокопроизводительных процессоров, графических ускорителей и нейросетевых модулей. Разработанные поверхности перспективны для охлаждения силовых модулей (IGBT, MOSFET), инверторов, а также элементов компактных энергогенерирующих установок. Принципы структурирования поверхностей применимы для интенсификации теплообмена в микро- и мини-канальных теплообменниках, испарителях парокompрессионных систем и элементах пассивного охлаждения.

Положения, выносимые на защиту:

1. Более эффективное охлаждение поверхностей теплообмена реализуется за счет «термического» распыления воды на структурированных поверхностях с экстремальной смачиваемостью, а не «вторичного» распыления на LIS-поверхностях: снижение температур в приповерхностном слое поверхности теплообмена (на расстоянии 600 мкм от границы контакта с каплей воды) составляет до 32,5 °С для супергидрофильной поверхности при ее начальной температуре 140 °С; до 22 °С для супергидрофобной поверхности при 180 °С, до 12 °С на LIS (независимо от состава смазки – масло, ПЭФ-350) при 160 °С.

2. Для поверхностей теплообмена с пространственно-контролируемым контрастным смачиванием (бифильных структурированных поверхностей) скорость испарения не может являться единственным корректным критерием оценки эффективности охлаждения. Специфика механизмов интенсификации теплообмена на таких поверхностях, обусловленная формированием воздушных полостей под каплей жидкости на супергидрофобных участках и многократным усилением внутренних термокапиллярных (марангоновских) течений, средние

скорости которых в 3–10 раз превышают значения, характерные для однородной полированной поверхности, должна учитываться увеличением длины линии трехфазного контакта (до 2,5 раз по сравнению с условиями испарения аналогичных капель на полированных поверхностях).

3. Структурирование поверхностей теплообмена путем формирования заданной шероховатости и контраста смачиваемости является инструментом управления режимами испарения теплоносителя (капель воды) в широком диапазоне температур от 80 °С до 280 °С, что выражается в кратном увеличении интенсивности теплоотвода, характеризуемом как абсолютным снижением температуры поверхности, так и смещением максимума охлаждающего эффекта в область более высоких температур.

Достоверность результатов исследования подтверждается оценками систематических и случайных погрешностей измеряемых величин, повторяемостью выполненных измерений, непротиворечивостью полученных результатов законам физики и положениям теории тепломассообмена, а также использованием современного поверенного аналитического оборудования и программно-аппаратных комплексов.

Связь работы с научными программами и грантами. Диссертационные исследования выполнены в рамках реализации соискателем грантов РФФИ № 23-73-30004 (Регистрационный номер: 123052200125-5) «Лазерные стратегии в инновационном материаловедении: от авиации и теплоэнергетики до медицины и машиностроения» с 2024 года по настоящее время и № 23-29-00417 (Регистрационный номер: 123011700014-4) «Системы охлаждения энергонасыщенного оборудования, базирующиеся на микровзрывном диспергировании капель теплоносителей» с 2023 года по 2024 год.

Личный вклад автора состоит в разработке и изготовлении оригинальных экспериментальных стендов; разработке и реализации оригинальных программно-аппаратных комплексов для бесконтактной регистрации и визуализации процессов тепломассопереноса; планировании и проведении экспериментальных исследований; оценке случайных погрешностей измерения группы

регистрируемых параметров; разработке физических моделей исследуемых процессов; обработке, анализе и обобщении полученных результатов; формулировании практических рекомендаций; апробации результатов на научных конференциях и их опубликовании в соавторстве в рецензируемых периодических научных изданиях; формулировке защищаемых положений и основных выводов диссертационной работы.

Апробация работы. Основные результаты работы были представлены и обсуждены: XVII Всероссийской (IX Международной) научно-технической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых «Энергия-2022» (г. Иваново, 2022 год); IX Всероссийской конференции «Теплофизика и физическая Гидродинамика», (г. Сочи, 2024 год); XVI Всероссийском семинаре «Физико-химия поверхностей и наноразмерных систем», (г. Москва, 2025 год); XXIII Международной конференции студентов, аспирантов и молодых ученых «Перспективы развития фундаментальных наук», (г. Томск, 2026 год); XXX Международном молодежном научном симпозиуме имени академика М.А. Усова, «Проблемы геологии и освоения недр», (г. Томск, 2026 год).

Публикации. По теме диссертации опубликовано 4 научных работы в рецензируемых журналах, включенных в перечень ВАК, и журналах, индексируемых в базах данных Scopus и Web of Science.

Получены 1 ноу-хау «Способ создания бифильных поверхностей на основе комбинированной лазерно-химической модификации» (срок действия до 31 декабря 2031 года) и 1 свидетельство о регистрации программы для ЭВМ «Программа обработки видеозаписей для построения температурных полей нестационарных процессов горения и взрыва методом высокоскоростной двухцветной пирометрии» № 2022663029 (11 июля 2022 года).

Структура и объем работы.

Диссертационная работа состоит из введения, трех глав, заключения и списка литературы из 140 наименований; содержит 172 страницы машинописного текста, 30 рисунков, 10 таблиц, 4 приложения.

Содержание работы.

Во введении обоснована актуальность темы диссертационной работы, сформулированы цель и задачи исследований, практическая и теоретическая значимость работы, научная новизна и достоверность результатов, личный вклад автора.

В первой главе обобщены известные знания о современном состоянии исследования в области теплообмена при испарении капель жидкостей на структурированных поверхностях. Рассмотрены проблемы отвода тепловых потоков высокой плотности, влияние смачиваемости и шероховатости поверхности на гидродинамические режимы взаимодействия капли с разогретой стенкой, а также существующие представления о механизмах «термического» и «вторичного» распыления. Обоснована актуальность применения LIS- и бифильных поверхностей и сформулированы нерешённые вопросы, определяющие цель и задачи настоящего исследования.

Во второй главе приведены методики изготовления LIS, супергидрофильных и супергидрофобных поверхностей, а также поверхностей с контрастным смачиванием с комбинацией гидрофильных/ супергидрофильных, супергидрофильных/супергидрофобных свойств на основе алюминиево-магниевого сплава. Приведены методы и методики определения смачивания поверхностей, характеристик шероховатости, анализа микротекстуры, поверхностного натяжения. Приведен метод ван Осса–Чаудхури–Гуда для определения компонент поверхностного натяжения (дисперсионной и полярной) смазок и теплоносителя. Приведено описание двух оригинальных экспериментальных стендов по изучению процессов «термического» и «вторичного» распыления и испарения капель, включая подход, сочетающий методы PIV и PLIF с высокоточной локальной термометрией в приповерхностном слое, а также подход к оценке длины линии трёхфазного контакта. Приведены погрешности измеряемых величин.

В третьей главе приведены результаты экспериментальных исследований и их анализ. Сопоставлены два механизма распада капель при «термическом» и «вторичном» распылении. Приведен анализ характеристик созданных

поверхностей теплообмена. На основе расчетов по модели Preston определен механизм взаимодействия капли дистиллированной воды с созданными LIS. Проведено сопоставление характеристик «термического» и «вторичного» распыления. Проведен анализ эффективности охлаждения поверхностей теплообмена при «термическом» и «вторичном» распылении дистиллированной воды.

Для созданных микротекстурированных поверхностей доказана однородность микротекстуры при локальном изменении смачиваемости, что позволило отдельно оценить влияние шероховатости и смачиваемости на теплообмен. Установлены особенности режимов испарения капли дистиллированной воды на бифильных поверхностях с комбинацией экстремальных свойств смачивания. Методом PIV и PLIF определены конвективные течения и их характеристики, а также температурные поля в капле, испаряющейся на разработанных структурированных поверхностях. Проведен анализ чисел Марангони и Релея. Выполнена оценка влияния приповерхностных свойств на эффективность охлаждения по снижению температуры в приповерхностном слое в диапазоне температур нагрева от 80 °С до 300 °С. Классифицированы режимы взаимодействия капли дистиллированной воды с разработанными структурированными поверхностями и определены температурные диапазоны их применения.

В заключении представлены основные результаты исследований и выводы, сформулированные в диссертационной работе.

ГЛАВА 1. СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ ИССЛЕДОВАНИЙ ТЕПЛООБМЕНА ПРИ ИСПАРЕНИИ КАПЕЛЬ НА СТРУКТУРИРОВАННЫХ ПОВЕРХНОСТЯХ

В условиях развития микроэлектронных технологий, сопровождающегося уменьшением размеров полупроводниковых компонентов и одновременным увеличением их вычислительной мощности, проблема эффективного отвода тепловых потоков высокой плотности (более 100 Вт/см^2) [1] от интегральных схем является особо актуальной. Перегрев узлов электронных устройств до температур, превышающих эксплуатационные регламентированные значения (например, для центральных процессоров CPU/GPU в ПК и смартфонах $30\text{--}60 \text{ }^\circ\text{C}$; компонентов систем ИИ нейросетевых ускорителей, TPU $30\text{--}85 \text{ }^\circ\text{C}$, нейроморфных процессоров $40\text{--}60 \text{ }^\circ\text{C}$; силовой электроники IGBT, MOSFET, диодов до $150 \text{ }^\circ\text{C}$) не только сокращает срок службы оборудования, но и существенно снижает его надежность. Без разработки новых высокоэффективных решений охлаждения невозможно дальнейшее повышение быстродействия и снижение энергопотребления микрочипов, необходимых для построения перспективных информационных систем следующего поколения, включая суперкомпьютеры, автономные транспортные средства, роботизированные комплексы и инновационную бытовую технику.

Известные решения задачи охлаждения поверхностей основаны на способах, при которых теплоноситель находится либо в однофазном, либо в двухфазном состоянии. Однофазные системы, где теплоноситель (например, вода или хладагенты) сохраняет агрегатное состояние в процессе теплообмена, эффективны при плотности теплового потока до 100 Вт/см^2 [4,9,10]. Это связано с ограничениями по коэффициенту теплоотдачи, гидравлическому сопротивлению, допустимой мощности насосов и вентиляторов, а также ростом температурного напора при увеличении тепловой нагрузки. При тепловой нагрузке более 100 Вт/см^2 возникает необходимость перехода к системам, основанным на принципах фазового перехода. Такие системы способны эффективно рассеивать

тепловые потоки высокой плотности за счёт скрытой теплоты парообразования (для воды 2257 кДж/кг при 100 °С) [3], обеспечивая интенсивный отвод теплоты при компактных габаритах системы охлаждения.

Известно [10], что системы охлаждения, работающие на принципе капельного орошения (спрейные системы охлаждения), способны обеспечивать устойчивый отвод тепловых потоков до 1000 Вт/см² и выше при коэффициентах теплоотдачи 100–500 кВт/(м²·К) [3], что делает такие системы наиболее перспективными для охлаждения теплонагруженных электронных компонентов.

Широкое внедрение систем охлаждения на базе капельного орошения требует решения актуальных задач, связанных с интенсификацией процессов испарения капель теплоносителей, управлением режимами испарения теплоносителя, транспорта и локализации капель в зонах наибольшего перегрева. Перспективным подходом к решению вышеобозначенных задач является создание специально структурированных поверхностей теплообмена с заданной текстурой (шероховатостью) и смачиванием. Последнее обусловлено тем, что характеристики теплообмена существенно зависят от вида текстуры [11], шероховатости и гидрофильно-гидрофобного контраста [12,13].

Существующие подходы к структурированию поверхностей можно условно классифицировать по геометрии создаваемого рельефа (от регулярных микроструктур до стохастической шероховатости) и по характеру смачиваемости. К классическим методам относят формирование микроканалов (микрорёбер) [14] различного профиля, создание пористых структур (например, спеченных порошковых покрытий [15]), а также массивов микростолбиков («штыревое или игольчатое ребрение») [16,17]. Дальнейшим развитием этого направления стало создание поверхностей с градиентом смачиваемости. Особый интерес представляют бифильные поверхности, на которых сформированы выраженные гидрофильные участки на гидрофобной основе или наоборот [18]. Наличие такого контраста смачивания позволяет управлять растеканием капель [19], пиннингом (закреплением) трехфазной линии контакта [20] и, как следствие, локализовать испарение в зонах с наибольшим тепловыделением [21].

Принципиально иным классом являются поверхности со смазочной пропиткой (LIS – Liquid-Infused Surfaces). Твердые поверхности с развитой микро- или наноструктурой приповерхностного слоя, удерживающей вязкую жидкость, относятся к классу LIS. Благодаря капиллярным силам смазка удерживается в текстуре, формируя сверхгладкую и химически гомогенную пленку жидкости на поверхности [22]. Такой подход позволяет добиться исключительно низкого гистерезиса контактного угла и малого угла наклона для скатывания капель (скользкие свойства, напоминающие поверхности хищных растений рода *Nepenthes*) [22]. Комбинация объемных свойств металлов и уникальных приповерхностных свойств LIS обеспечивает широкий потенциал возможного применения этого класса поверхностей при решении проблем, связанных с обледенением, загрязнением, бактериальной стойкостью и другими приложениями, в которых используются поверхности с гидрофобными/супергидрофобными свойствами [23,24]. Потенциально LIS перспективны и для решения задач в теплофизике и теплотехнике. Жидкая прослойка (смазка/лубрикант) может предотвращать загрязнение поверхности [25], [26] и является фактором, обуславливающим механизм «вторичного» распыления (диспергирования) капли теплоносителя вплоть до образования аэрозоля с существенно большим покрытием площади охлаждаемой поверхности вторичными каплями малого размера по сравнению с «термическим» распылением.

1.1 LIS-поверхности: принципы создания, свойства и перспективы применения в теплоэнергетическом оборудовании

Как было отмечено выше, поверхности, наполненные жидкостью (LIS), это поверхности с развитой текстурой приповерхностного слоя, покрытого вязкой жидкостью толщиной, достаточной для формирования гладкой поверхности. Первые результаты исследований LIS были опубликованы в 2011 году [22,27], а

накопленный экспериментальный и теоретический материал обобщен в обзорных работах [24,28–30].

В зависимости от масштаба и конфигурации текстуры приповерхностного слоя LIS условно можно разделить на три класса [24]: одномерные, двумерные и трехмерные. Толщина слоя вязкой жидкости на одномерных и двумерных, как правило, сопоставима с размером поверхности микрорельефа, образуемого выступами и впадинами. Последнее количественно описывается трехмерным параметром шероховатости S_z , который определяется как среднеарифметическая разность между наиболее высокими вершинами и глубокими впадинами [31,32]. В одномерных LIS текстура и толщина слоя вязкой жидкости не превышает десятка нанометров. В двумерных текстура приповерхностного слоя развитая, многомодальная, характерный размер микроуровня. Трёхмерные LIS изготавливаются из объёмнопористых материалов, благодаря чему их приповерхностный слой также обладает выраженной пористостью. У каждого класса поверхностей, наполненных смазкой, есть свои достоинства и недостатки, которые обобщены в [24]. В частности, на одномерных LIS процесс истощения смазки и, как следствие, деградация поверхностных свойств происходит значительно быстрее, чем на дву- и трехмерных. В отличие от трёхмерных LIS, в качестве основы для изготовления двумерных могут использоваться металлы и их сплавы. Гидрофобные и супергидрофобные свойства LIS объясняют их превосходство над полированными поверхностями металлов. Выше уже был отмечен потенциал применения двумерных LIS при решении проблем, связанных с обледенением, загрязнением, бактериальной стойкостью [23].

Несмотря на широкое исследование LIS в приложениях антиобледенения, антикоррозии, антизагрязнения и биостойкости, исследований по их применению в теплофизических и теплотехнических задачах, связанных с фазовыми превращениями, пока относительно немного. Однако имеющиеся работы по использованию LIS в качестве поверхностей теплообмена при конденсации и кипении теплоносителей показывают следующее:

1) наличие смазки на LIS незначительно ухудшает теплофизические свойства поверхностей нагрева [25];

2) LIS демонстрируют высокую стойкость к загрязнениям, в том числе к биообрастанию, что позволяет сохранить их теплопередающие свойства [25];

3) LIS стойки к формированию накипи [33];

4) LIS характеризуются повышенным числом центров конденсации на единице площади поверхности [34];

5) LIS способствуют капельной конденсации, предотвращая формирование пленочной конденсации [34–36], что приводит к росту скорости теплоотдачи до 15 раз [37].

Известно [38], что при взаимодействии с каплями воды (наиболее широко распространённого теплоносителя) в качестве смазочного материала для LIS рекомендуется выбирать жидкости с низким поверхностным натяжением ($\gamma < 30$ мН/м) и преобладанием дисперсионной составляющей в поверхностном натяжении. Перфторполиэфиры (ПЭФ) и силиконовые масла наиболее часто используются в качестве смазок из-за их химической инертности и низкой взаимной растворимости с водой.

При высоких температурах (меньше 150 °С для многих смазок) возникает деградация гидрофобных свойств LIS. Известно [29], что при температурах выше 200 °С происходит интенсивное испарение и термическая деградация органических смазок, что приводит к быстрой потере функциональных свойств поверхности. Неорганические расплавы (например, солевые эвтектики) рассматриваются [39] как перспективная альтернатива для высокотемпературных применений, но их практическое использование ограничено из-за высокой вязкости и коррозионной активности. Нанесение смазки возможно как на супергидрофильные, так и на супергидрофобные основы двумерных LIS [23].

По результатам проведенного обзора современных достижений в области разработок LIS установлено отсутствие экспериментально полученных характеристик процесса испарения отдельных капель на поверхностях, пропитанных смазкой. Большинство работ посвящено конденсации или кипению

в объеме жидкости, тогда как процессы испарения капель, важные для спрейного охлаждения, остаются практически неизученными.

1.2 Бифильные поверхности

Бифильные поверхности, характеризующиеся гетерогенной (контрастной) смачиваемостью, представляют собой поверхности с разделенными гидрофильными и гидрофобными участками. Наличие контраста смачивания позволяет эффективно управлять формированием и динамикой трехфазной линии контакта [40], а также локальными тепловыми потоками [41] за счет создания направленных капиллярных сил.

В связи с интенсивным развитием прецизионных методов микроструктурирования металлов (лазерная абляция, фотолитография, химическое травление) в последние годы наблюдается устойчивый рост числа исследований, посвященных применению бифильных поверхностей для решения актуальных задач теплофизики. В частности, такие поверхности разрабатываются для создания систем охлаждения на базе капельного орошения [2,9,18,42,43]. Развиваются теоретические основы процессов испарения [13,44–46], конденсации [25,37,47–49] теплоносителей и транспорта жидкости [19,50–53] на таких поверхностях.

Бифильные поверхности, позволяют комбинировать два механизма интенсификации теплообмена:

- управление пиннингом (закреплением) контактной линии, что препятствует неконтролируемому растеканию теплоносителя и образованию сухих пятен при высоких тепловых нагрузках;

- перераспределение внутренних течений в капле (течений Марангони и капиллярных течений), возникающих из-за градиентов температуры и поверхностного натяжения, что способствует более эффективному отводу теплоты от перегретых зон.

Бифильные поверхности позволяют не только локализовать испарение в заданных областях, но и существенно повысить значение критического теплового потока, что делает их особенно перспективными для интеграции в компактные устройства охлаждения микроэлектроники следующего поколения [43].

Известные [12,13,44,45,54–63] подходы к созданию бифильных поверхностей изменяют одновременно как химический состав, так и морфологию (шероховатость) в гидрофильных и гидрофобных областях. Наиболее распространённым подходом к созданию бифильных поверхностей является фотолитографическое формирование микропаттернов с последующей селективной химической модификацией [38,59,64–66]. Позволяет формировать регулярные гидрофильные и гидрофобные пятна, полосы или решетки с характерными размерами от единиц до сотен микрометров. Однако данный подход сложно масштабировать на детали сложной геометрической формы, также он финансово затратный [29,30,67].

Обработка поверхностей металлов лазерным излучением [68] позволяет изменять не только элементный состав с образованием новых химических соединений, но и текстуру приповерхностного слоя с формированием наноразмерных элементов, а при их агрегации образуются микроразмерные структуры. Существенное изменение элементного состава и текстуры позволяет получать заданные приповерхностные свойства и тем самым управлять физико-химическими процессами, протекающими на технологических поверхностях, в том числе испарением, кипением и конденсацией теплоносителей. Необходимо отметить, что воздействия на поверхность металлов излучением нано-, пико- и фемтосекундной длительностью имеют существенные различия. Последнее обусловлено тем, что при пико- и фемтосекундной лазерной обработке в пятне луча очень высокая пиковая мощность и зона термического влияния ограничена пятном луча [31,66,69]. То есть в микрорегионе от лазерного пятна не происходит модификация приповерхностного слоя в отличие от наносекундной лазерной обработки. При наносекундной обработке происходят более масштабные изменения элементного состава и текстуры. Но при этом и короткоимпульсная

(пико- и фемтосекундная) и наносекундная лазерная обработка позволяет кардинально изменить приповерхностные свойства металлов и их сплавов. Известно [70–76], что за счет модификации лазерным излучением (нано-, пико- и фемтосекундной длительности) поверхностей теплообмена, изготовленных из меди, стали, алюминия, можно увеличить критический тепловой поток и коэффициент теплоотдачи при кипении теплоносителей.

Наличие контрастных по смачиваемости областей на поверхности приводит к множественным линиям пиннинга [77], что радикально меняет эволюцию контактной линии по сравнению с однородными поверхностями. Гидрофильные пятна служат центрами пиннинга, а супергидрофобные области, напротив, облегчают локальное депиннирование, в результате чего формируются сложные режимы «ступенчатого» перемещения контактной линии. Это отражается в продолжительности режимов испарения капли с постоянным диаметром (CCD, constant contact diameter) и постоянным контактным углом (CCA, constant contact angle) [12,78].

На бифильных поверхностях формируются специфические формы капель, включая кольцевые [13], сегментированные капли, удерживаемые гидрофильными дорожками, асимметричные профили при наклоне поверхности [79]. Такие формы приводят к увеличению длины трёхфазной линии и, как следствие, к росту локальных тепловых потоков вблизи контактной линии.

Известно [13,80], что соотношение площадей гидрофильных и гидрофобных зон для наилучшего теплоотвода составляет 60:40 – 70:30. При меньшей доле гидрофильных зон снижается площадь прямого теплового контакта, при большей – ослабевает эффект усиления конвекции за счет контраста смачиваемости.

Особый интерес представляют бифильные поверхности с экстремальным контрастом смачиваемости (супергидрофильные/супергидрофобные зоны). Авторами [42] установлено, что такие поверхности обеспечивают расширение температурного диапазона эффективного охлаждения до 180–200 °С против 140–160 °С для однородных поверхностей. Механизм этого эффекта связан с

подавлением режима Лейденфроста за счет локального разрушения паровой пленки на границах раздела зон.

В результате анализа известных достижений в области исследований процесса испарения капель на бифильных поверхностях установлено противоречие: в работах [13,58] зарегистрирован рост времени испарения капли на бифильных поверхностях при этом результаты исследований [81] демонстрируют улучшение теплоотвода, тогда как другие [60] свидетельствуют о его снижении при тех же условиях. Это противоречие указывает на необходимость разделения критериев эффективности: время испарения капли не всегда характеризует интенсивность теплоотвода, особенно при наличии сильных внутренних конвективных течений в капле.

Контраст смачиваемости влияет на распределение температуры по поверхности капли, что усиливает течения Марангони [82]. Эти течения могут усиливать перенос теплоты от поверхности в объём капли, а также влиять на локальное истончение жидкой плёнки вблизи гидрофильных областей. В результате бифильность действует как пассивный механизм управления внутренней гидродинамикой капли теплоносителя.

1.3 Влияние смачиваемости и шероховатости поверхности на гидродинамические режимы взаимодействия капли с нагретой стенкой. «Термическое» и «вторичное» распыление капель.

Текстура (шероховатость) и смачивание поверхностей теплообмена влияют на процесс испарения капель. Влияние этих факторов неоднозначно и существенно зависит как от условий нагрева поверхности, так и от её температуры относительно температуры насыщения теплоносителя.

Авторы [4] исследовали гидродинамику капель, ударяющихся о нагретые поверхности различной смачиваемости. Метод включал высокоскоростную визуализацию и анализ морфологии капель при различных температурах поверхности (25–300 °С) и числах Вебера (10–100). По результатам были

построены режимные карты взаимодействия капли жидкости с поверхностью в зависимости от температуры поверхности и числа Вебера. Авторы фокусировались на визуализации гидродинамических режимов и анализе геометрических параметров капли (контактный диаметр, высота, время жизни).

Известно [1], что нагрев поверхности выше температуры кипения теплоносителя приводит к смещению температуры начала и окончания стадий испарения (кривой испарения): развитая шероховатость и супергидрофильность увеличивают эти пороговые значения, тогда как супергидрофобность, напротив, понижает их.

Смачиваемость поверхности оказывает влияние на начальную стадию растекания капли, динамику контактной линии и формирование зон интенсивного теплообмена. Гидрофильные поверхности способствуют увеличению площади контакта капли с нагретой стенкой [4].

Увеличение гидрофильности поверхности теплообмена приводит к снижению температуры Лейденфроста и увеличению времени контакта капли с поверхностью. В [83] установлено, что температура Лейденфроста для капли воды, расположенной на полированной поверхности нержавеющей стали зависит от смачиваемости. Изменение смачиваемости может существенно влиять на механизмы испарения капель. Исследования [61] влияния покрытий с вертикально и горизонтально ориентированными углеродными нанотрубками на испарение капель воды показали, что ориентация нанотрубок существенно влияет на интенсивность теплообмена. Вертикальная ориентация обеспечивает более эффективное охлаждение за счет усиления капиллярного подсоса жидкости. В [56] при исследовании испарения капель на нагретой супергидрофобной подложке установлено, что при высоких температурах нагрева поверхности наблюдается переход от режима испарения с постоянным радиусом к режиму с постоянным углом, что влияет на интенсивность теплообмена.

По результатам экспериментальных и численных исследований [44] испарения капли воды на нагретых гидрофобных и супергидрофобных поверхностях установлено, что на супергидрофобных поверхностях температура

Лейденфроста может превышать 250 °С (против 180–200 °С на полированных поверхностях), что расширяет рабочий диапазон эффективного охлаждения [45].

Авторами [59] установлено, что изменение смачиваемости поверхности в процессе испарения капли позволяет контролировать скорость испарения и интенсивность теплообмена. В [13] установлено, что контраст смачиваемости приводит к формированию сложных режимов испарения, включая образование кольцевых структур капли.

Микро- и нанощероховатость поверхности изменяет условия формирования паровой прослойки под каплей и ее устойчивости [53,84]. Иерархические структуры способны усиливать капиллярную смачиваемость поверхности, увеличивать число центров парообразования и препятствовать формированию сплошной паровой пленки, что приводит к повышению температуры Лейденфроста.

Экспериментально установлено [85,86], что нанесение микро- и наноразмерных иерархических структур на поверхность нержавеющей стали обеспечивает увеличение температуры Лейденфроста более чем на 170 °С по сравнению с полированной поверхностью, достигая значений более 490 °С.

Повышение эффективности теплообмена на структурированных поверхностях обусловлено подавлением устойчивой паровой пленки за счет:

- капиллярного подсоса жидкости в микроструктуры;
- локального разрушения паровой прослойки;
- увеличения плотности центров парообразования;
- формирования неравномерных температурных полей, препятствующих устойчивости пленочного кипения.

Помимо температуры Лейденфроста, шероховатость и смачиваемость влияют на режимы растекания и «термическое» распыление капли.

Механизм «термического» распыления капли после удара о перегретую подложку исследован авторами [87] с применением высокоскоростной съемки. Установлено, что «термическое» распыление обусловлено неустойчивостью

Рэлея-Тейлора на границе жидкость-пар, возникающей при росте паровых пузырей. Пороговая температура начала распыления для воды на металлических поверхностях составляет 110–130 °С и слабо зависит от материала поверхности, но существенно зависит от шероховатости и смачиваемости.

Для воды в качестве теплоносителя при температурах поверхности, превышающих температуру насыщения, на LIS могут протекать процессы не только «термического» распыления, но и «вторичного» [88], известные под термином диспергирование [89]. «Вторичное» распыление капель жидкостей хорошо изучено в области горения и зажигания многокомпонентных капель топлив [89,90]. «Вторичное» распыление разделяют на два основных типа: паффинг и микровзрыв. Паффинг характеризуется разделением капли на более крупные фрагменты, а микровзрыв – интенсивным разрушением капли с образованием аэрозоля [91].

Авторами [92] исследованы механизмы «термического» распыления капель при их соударении с нагретой поверхностью. При этом текстура поверхности была близка к молекулярно-гладкой со значением средней шероховатости, оцененной параметром $Ra \approx 0,05$ мкм. В зависимости от температуры поверхности выделены следующие гидродинамические режимы соударения капли с поверхностью [6]: (1) «осаждение капли»; (2) «танец» капли; (3) «отскок» и (4) «термическое распыление» капли. Режим «танца» капли является переходным между режимом «осаждения» и «отскоком» капли. Такое поведение капли на нагретой поверхности объясняется многочисленными пузырьками пара и слоями жидкости, которые растут и разрушаются [93]. В режиме «отскока» капля отскакивает от поверхности после ее растекания и сжатия. Такой режим обусловлен формированием пара под каплей. Режим отскока может сопровождаться незначительным диспергированием «родительской капли» на более мелкие фрагменты. «Термическое» распыление капли реализуется при высоких температурах нагрева поверхности (от 120 °С), характеризуется формированием большего числа мелких вторичных капель и/или нескольких крупных капель.

В работе [3] при испарении капель воды на поверхностях металлов по зарегистрированным характеристикам распада капель выделен режим испарения «контактное кипение» аналогичный по характеристикам режиму «термическое» распыление, установленному в [87]. Помимо режима «контактное кипение» авторы [60] выделили режим испарения – «пленочное кипение». Последний по сути является кризисом испарения второго рода и реализуется при температурах, известных как температура Лейденфроста [94].

Известно [95], что интенсивность «термического» распыления при столкновении капли с нагретой поверхностью зависит от температуры поверхности и происходит аналогично кипению в объеме жидкости: с увеличением температуры поверхности, количество пузырей увеличивается, интенсивность диспергирования растет. При реализации условий, способствующих коалесценции (соединению) пузырьков пара, интенсивность диспергирования снижается из-за теплоизолирующего действия пузырьков на поверхности раздела «теплоноситель – поверхность теплообмена». При достижении температуры Лейденфроста диспергирование подавляется за счет формирования стабильной паровой пленки.

Реализация «термического» распыления зависит не только от характеристик поверхности (смачивания, шероховатости, температуры), но и от числа Вебера (скорости и размера капли) [92]. В условиях столкновения капли воды с полированной поверхностью алюминия, нагретой до температур 50–400 °С, и при числах Вебера до 160 выделено [87] пять различных режимов: три независимых режима («вторичное» распыление, «отскок» и «разбрызгивание») и два смешанных режима («отскок со вторичным распылением» и «разбрызгивание с вторичным распылением»).

При обобщении известных результатов исследований можно сделать выводы о том, что при взаимодействии с нагретой поверхностью капля теплоносителя может испаряться в трех гидродинамических режимах, реализующихся последовательно с увеличением температуры: «испарение без кипения» – «кипение» – «кризис кипения второго рода (состояние

Лейденфроста)». Данная классификация не претендует на формализацию или универсализацию терминологии, а лишь отражает суть протекающих процессов в каждом из указанных режимов. Как следует из приведённого обзора, в пределах режима «кипения» возможно выделение ряда подрежимов (до пяти [92]), обусловленных конкретными условиями испарения капли теплоносителя. Следует отметить, что в литературе используются разнообразные термины – «термическое распыление», «контактное кипение», «диспергирование», «паффинг», «вторичное распыление» – для описания процессов фрагментации капли на более мелкие вторичные.

1.4 Критерии и методики оценки эффективности охлаждения поверхностей за счет испарения капель теплоносителей

Известные критерии оценки эффективности охлаждения поверхностей различаются. Чаще всего анализируется скорость испарения капли или время её полного испарения. Например, такой подход используется в работах [58,78]. Он не позволяет напрямую оценить снижение температуры поверхности, вызванное испарением капли. Последнее реализовано лишь в отдельных работах, использующих методы инфракрасной термографии [45,59] или установкой термопары под поверхностью теплообмена [96] либо на поверхности вблизи капли [97]. В таблице 1.1 приведены известные критерии оценки эффективности охлаждения поверхности, обусловленного испарением капли теплоносителя.

Таблица 1.1 – Известные экспериментальные данные по характеристикам процесса испарения капель воды на модифицированных поверхностях

Материал поверхности	Подход/метод обработки поверхности	Контактный угол гидрофильной / гидрофобной области, °	Объем капли, температурный диапазон исследования	Критерии оценки эффективности охлаждения поверхности, обусловленного испарением капли теплоносителя	Ист.
Cu	Покрытие PFOCTS + лазерное текстурирование с низкой (1,69 Дж/см ²) и высокой (3,82 Дж/см ²) плотностью потока энергии (гидрофобная подложка + супергидрофильное кольцо $d_{out} = 1,6$ мм; h от 0,10 до 0,25 мм)	~150° (подложка) / <10° (кольцо) Степень гидрофобизации (под каплей) 76,5 % ($h = 0,10$ мм) до 47,3 % ($h = 0,25$ мм)	$V = 9,5 \pm 0,5$ мкл $T = 100-120$ °C	Термопара помещалась на 1 мм от поверхности, регистрировалось время испарения капли	[13]
CaF ₂	Подложка CaF ₂ + покрытие Glaco + селективное УФ-облучение (супергидрофобная подложка + гидрофобное пятно $d = 1,5$ мм)	164° (подложка) / 90–110° (пятно)	$V = 8$ мкл $T = 74$ °C	Инфракрасные изображения	[58]
Стеклопластиковая пластина	Spin-покрытие (центрифугирование расплава Teflon)	$\theta_h = 122,5^\circ - 112,7^\circ = 9,8^\circ$	$V = 95,7$ мкл $T = 64$ °C	Температуру подложки измеряли термопарой, закрепленной на расстоянии 1–2 мм от капли. Время испарения капли	[12] [44]
Стеклопластиковая пластина	Spray-нанесение частиц Teflon (полифторированные частицы)	$\theta_h = 119,9^\circ - 90,6^\circ = 29,3^\circ$	$V = 88,7$ мкл $T = 64$ °C	Время испарения капли	[12] [44]
Al (aa6061)	Селективное диссоциативное травление в растворе 1 М FeCl ₃ , с последующим замачиванием и запеканием	150–165° (гистерезис ~6°)	$V = 4$ мкл $T = 50$ °C	Изменение контактных углов и объема от времени	[56]
Cu	Не указан	70° (квазистационарная конфигурация), два последовательных режима испарения	$V = 1,4$ мкл $T = 20-60$ °C	ИК-термография, теоретические модели для различных температур	[55]
Сапфировое стекло	Без подготовки	–	Диаметры каплей 1,80–2,22 мм $T = 150$ °C, 200 °C и 250 °C	Измерения методом TR-PIV Результаты измерения PIV, падающих на не нагретые поверхности, были сопоставлены с аналитической моделью, предложенной Roisman	[54]

Продолжение таблицы 1.1

Материал поверхности	Подход/метод обработки поверхности	Контактный угол гидрофильной / гидрофобной области, °	Объем капли, температурный диапазон исследования	Критерии оценки эффективности охлаждения поверхности, обусловленного испарением капли теплоносителя	Ист.
Cu	На поверхность нанесен тонкий (20 нм) слой Сuтор	~104°; контактный радиус 1,4 мм	$V = 10$ мкл $T = 30-79$ °С (локальный нагрев лазером)	Инфракрасная термография и оптическая визуализация	[63]
Cu, сталь (12x18н10т), латунь	Исследовались как полированные, так и шероховатые поверхности. Полированная поверхность: медный цилиндр с золотым покрытием, нанесенным плазменным напылением (для предотвращения окисления)	Не указаны	$V = 20-1000$ мкл T от 80 °С до 214 °С и выше (вплоть до режима пленочного кипения)	Измерение убыли массы капли, термография.	[62]
Cu	Первая подложка – без покрытия. Вторая подложка – покрыта одностенными углеродными нанотрубками методом распыления (толщина порядка 1 мкм)	Для обеих подложек: $\theta_h = 85 \pm 8^\circ - 23 \pm 6^\circ$	$V < 2$ мкл $T = 24-100$ °С	Изменение контактного диаметра капли и контактного угла от времени	[61]
Al	Напыление тонких пленок: 1) гидрофильные наночастицы кремния; 2) без напыления; 3) ПТФЭ; 4) гидрофобные наночастицы кремния	1) 10°; 2) 78°; 3) 122°; 4) 157°	$V=12,5$ мкл $T = 100-300$ °С	Время испарения	[60]
Cu	Без подготовки	Не приведены	$V = 1,4$ мкл $T = 30$ °С, 40 °С, 50 °С и 60 °С	Инфракрасная термография	[98]

При обобщении известных результатов исследований можно сделать выводы о том, что принято оценивать эффективность охлаждения по скорости испарения капель, а также по снижению температуры поверхности теплообмена, измеряемым с применением инфракрасной термографии. Однако такие подходы позволяют регистрировать лишь изменение температуры на поверхности, а не в приповерхностном слое. Использование высокоточных и малоинерционных микротермопар, локализованных на поверхности или под ней, сопряжено со значительными погрешностями. В таких случаях термопара регистрирует усреднённую температуру, учитывая вклад окружающей среды либо нагревательного элемента, что затрудняет достоверную оценку температурных изменений непосредственно в объёме приповерхностного слоя. В настоящий момент отсутствуют опубликованные экспериментальные данные, характеризующие изменение температуры в приповерхностном слое теплообменных поверхностей вследствие испарения капли теплоносителя. Получение такой информации важно, как для углублённого анализа эффективности охлаждения, так и для верификации математических моделей этих процессов.

1.5 Нерешённые вопросы, определяющие актуальность настоящего исследования. Выводы по первой главе

Несмотря на значительное число работ, посвящённых испарению капель и интенсификации теплообмена на структурированных поверхностях, ряд принципиальных вопросов остаётся недостаточно изученным:

1. Отсутствуют экспериментальные данные по отдельному влиянию шероховатости и смачиваемости поверхностей теплообмена на характеристики испарения капель теплоносителя. Большинство методов модификации поверхностей одновременно изменяют оба параметра [42,78], что не позволяет выявить их независимый вклад в интенсификацию теплообмена. Необходимо разработать новые подходы по созданию

поверхностей теплообмена с контролируемой шероховатостью при фиксированной смачиваемости и наоборот.

2. Недостаточно изучены механизмы распыления капель жидкостей. В литературе отсутствуют данные о сравнении характеристик «термического» и «вторичного» распыления, а также их физических механизмах и влиянии на теплоотвод. Особенно малоизучены процессы распыления на LIS, где реализуются комбинированные механизмы.

3. Противоречивы данные по влиянию бифильных участков на теплообмен. Несмотря на рост числа работ по бифильным поверхностям, отсутствует общее решение относительно оптимального соотношения и конфигурации зон различной смачиваемости для максимального теплоотвода [13,42,57]. Не выявлены физические критерии выбора типа бифильной поверхности (гидрофильная/гидрофобная или супергидрофильная/супергидрофобная) для конкретных температурных диапазонов.

4. Недостаточно изучены связи между внутренней гидродинамикой капли и эффективностью охлаждения. Отсутствуют исследования влияния термокапиллярной и термогравитационной конвекции на распределение температуры в капле и локальную интенсивность теплоотвода [63,99].

5. Отсутствуют критерии выбора типа структурированных поверхностей для заданного температурного диапазона. Не разработаны рекомендации по применению полированных, супергидрофильных, супергидрофобных, бифильных или LIS в конкретных диапазонах температур.

Решение указанных вопросов требует комплексного подхода, сочетающего разработку методик независимого контроля параметров поверхности, применение современных методов диагностики (высокоскоростная визуализация, PIV, PLIF) и систематическое исследование теплообмена в широком диапазоне температур.

Существенным ограничением для апробации новых типов структурированных поверхностей теплообмена на промышленном

оборудовании является отсутствие диагностического инструментария, способного зарегистрировать характеристики тепловых процессов в высокотемпературных условиях. Широко распространенные контактные методы (термопарные измерения) обладают относительно высокой инерционностью, часто неприменимы из-за выхода из строя датчиков под действием агрессивной среды. Для преодоления данного ограничения в рамках диссертационных исследований разработан [100] метод высокоскоростной бесконтактной двухцветной пирометрии. Метод основан на анализе спектрального отношения интенсивностей излучения в зеленом и красном каналах КМОП-матрицы высокоскоростной видеокамеры, что позволяет регистрировать двумерные температурные поля с высоким пространственным (до уровня отдельных пикселей) и временным (2000 кадров в секунду и выше) разрешением. Разработанный диагностический инструмент является методологической основой для будущих исследований при апробации новых типов структурированных поверхностей. Применение данной методики позволит оценить влияние микротекстуры поверхности на интенсивность теплообмена в реальных высокотемпературных условиях, где применение средств контроля общепромышленного исполнения затруднено.

ГЛАВА 2. МЕТОДЫ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ МЕТОДИКИ ИССЛЕДОВАНИЯ ПРОЦЕССА ИСПАРЕНИЯ КАПЛИ И ТЕПЛОТВОДА

Вторая глава диссертации посвящена описанию разработанных экспериментальных методик, стендов, способов изготовления образцов для изучения процессов испарения капель воды и теплоотвода на структурированных поверхностях теплообмена.

В рамках диссертационного исследования на основе алюминиево-магниевых сплавов АМГ-2 и АМГ-3 изготовлены семь типов поверхностей, включая референтные полированные образцы, супергидрофильные и супергидрофобные поверхности с многомодальной шероховатостью, а также четыре типа LIS, пропитанных маслом и перфторполиэфиром. Описан процесс лазерной обработки наносекундной длительности, режимы гидрофобизации и методика пропитки пористых структур смазочными материалами. Разработана методика создания бифильных структурированных поверхностей с контролируемым контрастом смачивания, включая комбинации супергидрофильных и супергидрофобных, а также супергидрофильных и гидрофильных участков.

С использованием методов сканирующей электронной микроскопии, конфокальной лазерной профилометрии и тензиометрии выполнен анализ текстуры, определены трехмерные параметры шероховатости, контактные углы и углы скатывания, а также определены компоненты поверхностного и межфазного натяжения тестовых жидкостей и смазок по методу ван Осса–Чаудхури–Гуда (метод van Oss–Chaudhuri–Good).

Для исследования динамики испарения смонтировано два оригинальных экспериментальных стенда, оснащенных высокоскоростными видеокамерами, оборудованием теневой методики, прецизионными термopарами и системами сбора данных. Приведены методики определения кинетики испарения, «эффекта охлаждения» приповерхностного слоя, а

также методы бесконтактной диагностики. Система PIV использовалась для визуализации и определения скоростей внутренних конвективных течений в капле и PLIF для построения температурных полей с использованием Rhodamine B в качестве флуорофора.

Разработан оригинальный графоаналитический подход к оценке протяженности линии трехфазного контакта на бифильных поверхностях, учитывающий стохастическое расположение капли. Все методики характеризуются высокой воспроизводимостью, а погрешности измерений находятся в пределах допустимых значений для теплофизического эксперимента.

2.1 Методы и методики исследования «термического» распыления капель воды на полированных и структурированных поверхностях и «вторичного» распыления на LIS

2.1.1 Изготовление супергидрофильных и супергидрофобных, LIS поверхностей

В качестве материала для изготовления поверхностей теплообмена выбран алюминиевый сплав АМГ-2, широко используемый в конструкциях систем охлаждения теплонагруженных поверхностей. Поверхности выполнены в виде пластин шириной 15 мм, длиной 15 мм, толщиной 1,2 мм. В таблице 2.1 приведены условные обозначения и процедуры обработки приповерхностного слоя семи поверхностей, используемых в экспериментальных исследованиях.

Семь поверхностей теплообмена, используемых в экспериментальных исследованиях, можно условно разделить на три группы по подходу к обработке приповерхностного слоя. В первую группу входит поверхность с условным обозначением Al_p . Ее приповерхностный слой обработан широко распространённым способом с применением абразивных материалов. Поверхность Al_p использовалась в качестве референтного образца. Текстура шести поверхностей (Al_{phil} , Al_{phob} , Al_{phil}^{oil} , Al_{phob}^{oil} , Al_{phil}^{PEF} , Al_{phob}^{PEF}) аналогична,

сформирована лазерным излучением наносекундной длительности при идентичных настройках лазерной системы.

Таблица 2.1 – Условные обозначения и процедуры обработки приповерхностного слоя поверхностей теплообмена

Условное обозначение	Процедуры обработки приповерхностного слоя	Свойства смачивания	Примечание
Al_p	Шлифовка + полировка абразивными материалами	Гидрофильные $\theta_0 = 86^\circ$	Традиционная обработка поверхностей теплообмена, использовался в качестве референтного образца
Al_{phil}	Лазерное излучение	Супергидрофильные $\theta_0 < 3^\circ$	Поверхности с экстремальными свойствами смачивания (супергидрофильные и супергидрофобные), с аналогичной развитой многомодальной текстурой
Al_{phob}	Лазерное излучение + гидрофобизация группами CH_2 и CH_3	Супергидрофобные $\theta_0 = 168^\circ$ $\theta_{roll} = 8^\circ$	
Al_{phil}^{oil}	Лазерное излучение + пропитка маслом	Гидрофобные $\theta_0 = 94^\circ$ $\theta_{roll} = 88^\circ$	LIS пропитанные маслом с аналогичной текстурой (основой), но различающиеся свойствами смачивания
Al_{phob}^{oil}	Лазерное излучение + гидрофобизация группами CH_2 и CH_3 + пропитка маслом	Гидрофобные $\theta_0 = 98^\circ$ $\theta_{roll} = 81^\circ$	
Al_{phil}^{PEF}	Лазерное излучение + пропитка ПЭФ 350	Гидрофобные $\theta_0 = 133^\circ$ $\theta_{roll} = 22^\circ$	LIS пропитанные ПЭФ-350 с аналогичной текстурой (основой), но различающиеся свойствами смачивания
Al_{phob}^{PEF}	Лазерное излучение + гидрофобизация группами CH_2 и CH_3 + ПЭФ 350	Гидрофобные $\theta_0 = 131^\circ$ $\theta_{roll} = 21^\circ$	

Эти шесть поверхностей различаются последующей обработкой приповерхностного слоя, проводимой для формирования экстремальных свойств смачивания и создания поверхностей, LIS. Поверхности Al_{phil}^{oil} , Al_{phob}^{oil} , Al_{phil}^{PEF} ,

Al_{phob}^{PEF} относятся к группе LIS. Две поверхности Al_{phil} , Al_{phob} относятся к группе поверхностей с экстремальными свойствами смачивания (супергидрофильными и супергидрофобными).

Поверхность Al_p обрабатывалась по хорошо апробированной методике [101] с использованием полировальной машины (Metkon) и набором паст, содержащих алмазный порошок, а также войлочного диска. Обработка проводилась до формирования зеркального блеска. После процедуры полировки поверхности очищались от остатков пасты и других загрязнений в ультразвуковой ванне в среде этилового спирта с последующей промывкой в дистиллированной воде. После процедуры очистки образцы сушились в естественных условиях в течение не менее 24 часов.

Обработка лазерным излучением наносекундной длительности поверхностей Al_{phil} , Al_{phob} , Al_{phil}^{oil} , Al_{phob}^{oil} , Al_{phil}^{PEF} , Al_{phob}^{PEF} проводилась по хорошо апробированной методике [42], с использованием импульсного волоконного лазера IPG-Photonics (IPG-Photonics). Характеристики настройки лазерной системы и гальваносканатора, используемые при обработке поверхностей: длина волны 1064 нм, длительность импульса 120 нс, частота 50 кГц, скорость перемещения луча лазера 1400 мм/с и количество линий прохода 35,7 на 1 мм, однократное прохождение луча с энергией в импульсе 0,944 мДж. В результате обработки лазерным излучением формировалась развитая, многомодальная шероховатость (пористая), а также осуществлялась пассивация приповерхностного слоя (формирование оксидов). После лазерной обработки поверхностей алюминиевого сплава происходила инверсия их свойств смачивания до супергидрофильного состояния. Последнее достаточно хорошо изучено [23,67], обусловлено развитой многомодальной шероховатостью и высоким содержанием оксидов металла (Al_2O_3) в приповерхностном, модифицированном слое. Для поверхности Al_{phil} обработка лазерным излучением являлась завершающей стадией.

После лазерной обработки осуществлялась гидрофобизация поверхностей Al_{phob} , Al_{phob}^{oil} , Al_{phob}^{PEF} путем пиролиза углеводородсодержащей жидкости 2Т (Vi Chemicals). После проведения гидрофобизации происходило изменение свойств смачивания поверхностей до супергидрофобного состояния, обусловленного связыванием гидрофобных групп CH_2 и CH_3 с поверхностью материала физической и химической связью. Для поверхности Al_{phob} процедура гидрофобизации являлась завершающей стадией.

Методом погружения в дисперсионные жидкости изготовлены поверхности, наполненные жидкостью (LIS): Al_{phil}^{oil} , Al_{phob}^{oil} , Al_{phil}^{PEF} , Al_{phob}^{PEF} . Поверхности Al_{phil}^{oil} и Al_{phil}^{PEF} характеризуются супергидрофильной основой с развитой шероховатостью, полученной при лазерной обработке. Поверхности Al_{phob}^{oil} и Al_{phob}^{PEF} характеризуются супергидрофобной основой с развитой шероховатостью, полученной при лазерной обработке с последующей гидрофобизацией. Смазки выбраны согласно известным рекомендациям [24]. В качестве смазки для поверхностей Al_{phil}^{oil} и Al_{phob}^{oil} использовалось масло (кинематическая вязкость 89,7 сСт, плотность 0,870 г/см³ значения при 20 °С), для поверхностей Al_{phil}^{PEF} и Al_{phob}^{PEF} – жидкость перфторполиэфира (ПЭФ-350 кинематическая вязкость 1659 сСт, плотность 1,911 г/см³ значения при 20 °С). Поверхности погружались в смазку на 12 часов. После погружения подвешивались вертикально к горизонту на 24 часа для удаления излишков смазки под действием силы тяжести.

2.1.2 Определение смачиваемости, анализ микроструктуры и шероховатости

Смачивание, характеризующиеся статическим контактным углом, определено по хорошо апробированным методикам [102,103] с использованием оборудования DSA 100. Погрешность измерения

статических контактных углов не превышала $0,2^\circ$, углов скатывания $0,5^\circ$. Значения статических контактных углов и углов скатывания определены как среднеарифметическое значение из пяти измерений, полученных при размещении, капли воды в разные места поверхностей. При измерении углов использовались капли воды объемом 10 мкл. Углы скатывания определены путем поворота поверхности с каплей относительно линии горизонта с помощью гониометра.

Текстура поверхностей исследовалась методом электронной микроскопии с использованием сканирующего электронного микроскопа (СЭМ) (Tescan Mira 3). Необходимо отметить, что поверхности LIS Al_{phil}^{oil} , Al_{phob}^{oil} , Al_{phil}^{PEF} , Al_{phob}^{PEF} содержат смазку (лубрикант), поэтому их текстура исследована до её нанесения.

Трёхмерные параметры шероховатости Sa (среднее арифметическое высоты), Sz (высота неровностей), Sdr (увеличение площади поверхности за счет шероховатости) определены методом оптической профилометрии с использованием конфокального сканирующего микроскопа Olympus Lext OLS4100 (Olympus NDT). Поле зрения области измерения составляло 259×259 мкм в соответствии со стандартами ISO 25178 и ISO 4288. Доверительный интервал в значениях трёхмерных параметров шероховатости, определенных по пяти измерениям в различных участках поверхности, не превышал 6 %.

2.1.3 Методы и методики определения поверхностного натяжения и их составляющих

Методами кольца Дью Нуи и пластины Вильгельми определены поверхностное натяжение воды, масла и ПЭФ-350, а также межфазное натяжение «вода – масло», «вода – ПЭФ-350», «глицерин – масло», «глицерин – ПЭФ-350» с использованием тензиометра K20 (KRUSS). Глицерин и вода использовались в качестве тестовых жидкостей при

определении составляющих поверхностного натяжения смазки. Измерения проведены при температуре жидкостей и окружающей среды 20 °С. Погрешность измерений не превышала 0,6 %.

Составляющие поверхностного натяжения жидких веществ определены методом ван Осса–Чаудхури–Гуда [104]. Согласно этому методу, поверхностное натяжение (γ) разделяется на две независимые составляющие: дисперсионную (или компоненту Лифшица–Ван-дер-Ваальса, γ^{LW}) и кислотно-основную (γ^{AB}). Дисперсионная компонента γ^{LW} объединяет взаимодействия, включая силы Лондона, а также взаимодействия наведённых и постоянных диполей. Кислотно-основная компонента γ^{AB} , эквивалентная полярной составляющей, описывает взаимодействия по Льюису, определяется как геометрическое среднее от кислотной (γ^+) и основной (γ^-) параметров поверхности.

Составляющие поверхностного натяжения (γ_i^{AB} , γ_i^{LW} , γ_i^+ , γ_i^-) смазочного материала (масла и ПЭФ-350) определялись с использованием системы уравнений [38]:

$$\begin{cases} \frac{(\gamma_l + \gamma_i) - \gamma_{li}}{\sqrt{\gamma_i^{LW}}} = \sqrt{\gamma_i^+} \sqrt{\frac{\gamma_i^-}{\gamma_i^{LW}}} + \sqrt{\gamma_i^-} \sqrt{\frac{\gamma_i^+}{\gamma_i^{LW}}} + 2\sqrt{\gamma_i^{LW}} \\ \frac{(\gamma_l + \gamma_j) - \gamma_{lj}}{\sqrt{\gamma_j^{LW}}} = \sqrt{\gamma_j^+} \sqrt{\frac{\gamma_j^-}{\gamma_j^{LW}}} + \sqrt{\gamma_j^-} \sqrt{\frac{\gamma_j^+}{\gamma_j^{LW}}} + 2\sqrt{\gamma_j^{LW}}, \\ \gamma_l = \gamma_l^{LW} + \gamma_l^{AB} \\ \gamma_l^{AB} = 2\sqrt{\gamma_l^+ \gamma_l^-} \end{cases} \quad (2.1)$$

где γ_i^{LW} , γ_i^{AB} , γ_i^+ , γ_i^- – компоненты поверхностного натяжения смазки (искомые величины); γ_l , γ_j , γ_u , – поверхностные натяжения смазки и тестовых жидкостей (глицерина и воды) (определены с помощью тензиометра); γ_{li} , γ_{lj} – межфазные натяжения между тестовой жидкостью и смазочным материалом, (определены с помощью тензиометра); γ_i^{LW} , γ_i^+ , γ_i^- , γ_j^{LW} , γ_j^+ , γ_j^- – компоненты поверхностного натяжения тестовых жидкостей (справочные данные) [38,105].

В таблице 2.2 приведены значения поверхностных натяжений и их составляющих для тестовых жидкостей (справочные данные) и смазки (расчётные значения).

Таблица 2.2 – Поверхностные натяжения и их составляющие

Жидкость	γ , мН/м	γ^{LW} , мН/м	γ^{AB} , мН/м	γ^+ , мН/м	γ^- , мН/м
Вода	72,8	21,8	51,0	25,5	25,5
Глицерин	64,0	34,0	30,0	3,9	57,4
Масло	33,4	32,0	1,4	0,8	0,6
ПЭФ-350	18,8	18,8	0,0	0,0	0,0

2.1.4 Экспериментальный стенд для исследования процессов распада капель теплоносителя по механизмам «термического» и «вторичного» распыления

Процессы испарения капель дистиллированной, дегазированной воды по механизмам «термического» и «вторичного» распыления на созданных поверхностях теплообмена исследовались на стенде, модель которого представлена на рисунке 2.1. Автоматический лабораторный дистиллятор HR-1 (АРМЕД) использован для получения дистиллированной воды. Процедура дегазации заключалась в кипячении воды в течение не менее 20 минут при атмосферном давлении.

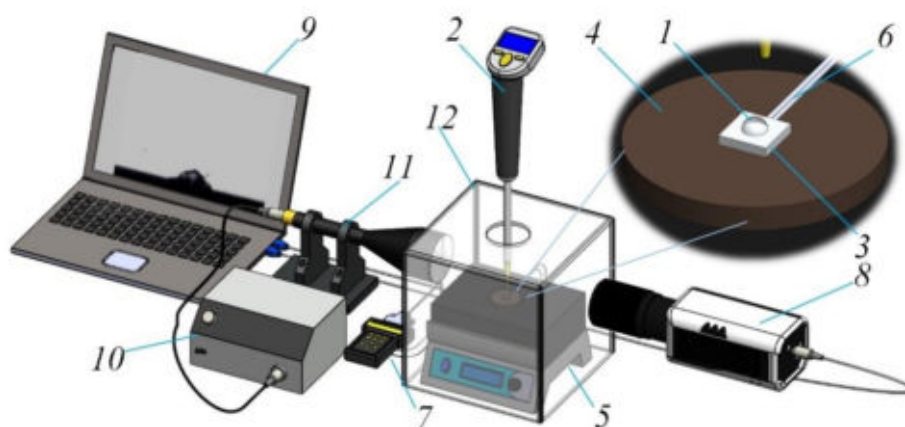


Рисунок 2.1 – Модель экспериментального стенда: 1 – капля; 2 – дозатор; 3 – образец; 4 – медный цилиндр; 5 – стеклокерамическая плита; 6 – термопара; 7 – контроллер; 8 – высокоскоростная видеокамера, оснащенная объективом; 9 – персональный компьютер; 10 – источник света; 11 – телецентрическая оптическая труба; 12 – прозрачный бокс

Капля воды 1 объемом 10 мкл с погрешностью $\pm 0,01$ мкл (размером 2,75 мм) помещалась одноканальным высокоточным электронным дозатором (Thermo Fisher Scientific) 2 на поверхность изготовленного образца 3. Образец поверхности 3 размещался на цилиндре 4 из меди диаметром 50 мм, толщиной 6 мм. Последнее исключало неравномерность нагрева поверхности образца 3. Цилиндр 4 нагревался с помощью стеклокерамической плиты (Томь Аналит) 5. Температура поверхности образца 3 контролировалась малоинерционной термопарой типа К CHAL-0005 с диаметром сая 13 мкм (Omega) 6. На рисунке 2.2 приведена 3D-модель размещения чувствительного элемента термопары в поверхностном слое образца металла.

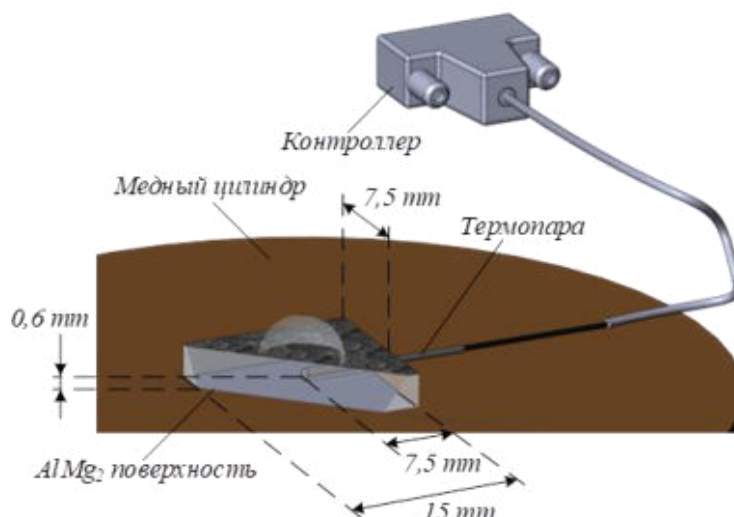


Рисунок 2.2 – Модель размещения термопары в приповерхностном слое образца металла

Спай термопары размещался на расстоянии 600 мкм от поверхности осесимметрично относительно боковых граней образца. Термопара б подключалась к контроллеру 7 (National instruments). Погрешность измерения температуры не превышала $\pm 0,1$ °С. Опрос термопары контроллером осуществлялся с шагом по времени 0,5 с. Последнее позволяло определить «эффект охлаждения» (изменение температуры) поверхности за счет дозирования на неё капли воды. Эксперименты проведены при температурах поверхности образцов 3 от 80 °С до 300 °С с шагом 20 °С. Процесс испарения капли регистрировался методом высокоскоростной съемки с использованием следующего оборудования: видеокамера Phantom M310 (Vision Research) 8; персональный компьютер 9 с установленным программным обеспечением PCC 2.6 (Vision Research). Скорость съемки составляла 1000 кадров в секунду с разрешением 640×480 пикселей, 12 бит. Плоскопараллельный свет, освещающий каплю, генерировался с помощью источника света (Edmund optics) 10 и телецентрической оптической трубы (Edmund optics) 11. Влияние внешних факторов на процесс испарения исключалось путем размещения поверхности с системой нагрева в боксе 12 из органического стекла. Для предотвращения влияния случайных

погрешностей проводилась серия из 10 экспериментов при хорошо воспроизводимых идентичных начальных условиях.

В экспериментальных исследованиях по видеозаписям определены характерное время задержки (τ) до реализации диспергирования «родительской капли», средний размер вторичных капель (d_{av}), число «капель малого размера» (N_s) (менее 0,1 мм), а также число «крупных капель» (N_l) (более 0,1 мм).

Задержка (τ) до диспергирования «родительской капли» определена с помощью программного обеспечения Phantom Camera Control (Vision Research) по хорошо апробированной методике [90]. За начало отсчета времени задержки до диспергирования капли принимался момент соприкосновения капли с нагретой поверхностью. Момент начала диспергирования «родительской капли» принимался за конечное значение для определения (τ). Случайная погрешность не превышала 10 %, систематическая погрешность составила не более 0,5 %.

Число и размер вторичных капель определялись с помощью ПО Tema Automotive (Image Systems AB). Типичный кадр обработки видеозаписи, иллюстрирующий принцип алгоритма обработки видеозаписей, представлен на рисунке 2.3.

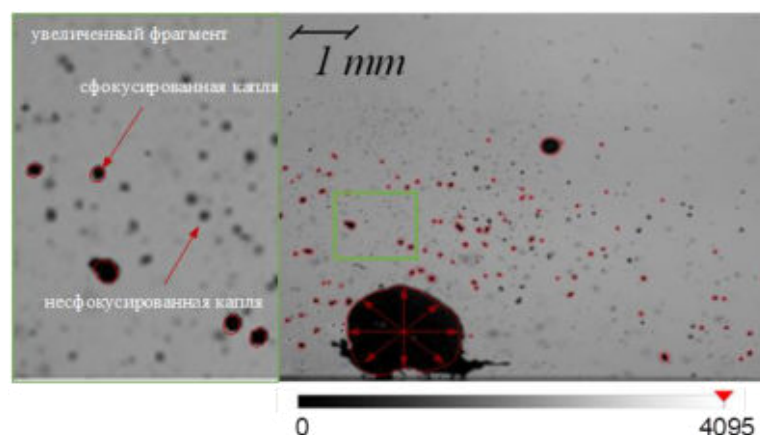


Рисунок 2.3 – Кадр алгоритма обработки видеозаписей

Систематическая погрешность измерений N_l , N_s , d_{av} , связанная с характеристиками объектива и настройками видеокамеры (включая параметры разрешения видеорегистрации), составила не более 3 %. Случайные погрешности, выявленные в сериях экспериментов, проведенных при идентичных начальных условиях, не превышали 20 %.

2.2 Методы и методики исследования структурированных поверхностей с контрастным смачиванием

2.2.1 Создание поверхностей с контролируемым контрастом смачивания

В качестве материала для изготовления образцов с структурированными поверхностями теплообмена выбран алюминиевый сплав марки АМГ-3. Последний широко применяется при производстве теплопередающих конструкций и систем охлаждения устройств, функционирующих в условиях интенсивных тепловых нагрузок. Данный материал обладает преимуществами по сравнению с медью: низкая стоимость, сочетание удовлетворительных значений теплопроводности и механической прочности, возможность формирования сложных текстур с помощью лазерных технологий. Образцы выполнены в виде прямоугольных металлических пластин размерами $15,0 \times 15,0 \times 1,1$ мм. По результатам серии предварительных экспериментов выделены 13 наиболее перспективных вариантов модификаций поверхности (таблица 2.3), с наибольшим потенциалом для интенсификации процессов испарения капель теплоносителей.

Таблица 2.3 – Характеристики поверхностей

Условное обозначение	$\theta_0, ^\circ$ *	$\theta_{roll}, ^\circ$ *	Вид текстуры	Примечание
Polished	$84,3 \pm 3,0$	–	Полированная	Обработка абразивными материалами (традиционная обработка теплопередающих поверхностей)
SHPHi	Менее 5	–	Развитая многомодальная шероховатость	Характеризуется супергидрофильными свойствами
SHPHo	168 ± 2	$7,0 \pm 2,6$		Характеризуется супергидрофобными свойствами
Поверхности с комбинацией супергидрофильных/супергидрофобных свойств				
Ext54	139 ± 10	«Эффект Розы»	Развитая многомодальная шероховатость	$S_{супергидрофоб.}/S_{супергидрофильн.} = 35,0 / 65,0 \cdot 100 \% = 53,8 \%$
Ext41	134 ± 11	«Эффект Розы»		$S_{супергидрофоб.}/S_{супергидрофильн.} = 29,1 / 70,9 \cdot 100 \% = 41,0 \%$
Ext31	135 ± 12	«Эффект Розы»		$S_{супергидрофоб.}/S_{супергидрофильн.} = 23,8 / 76,2 \cdot 100 \% = 31,2 \%$
Ext23	134 ± 12	«Эффект Розы»		$S_{супергидрофоб.}/S_{супергидрофильн.} = 18,6 / 81,4 \cdot 100 \% = 22,9 \%$
Ext16	132 ± 13	«Эффект Розы»		$S_{супергидрофоб.}/S_{супергидрофильн.} = 13,9 / 86,1 \cdot 100 \% = 16,1 \%$
Поверхности с комбинацией супергидрофильных/гидрофильных свойств				
Phi47	Менее 5	–	Комбинация микростолбиков с полированной поверхностью, частично покрытой продуктами абляции АМГ-3 и микроканалов с развитой многомодальной шероховатостью	$S_{гидрофильн.}/S_{супергидрофильн.} = 32,0 / 68,0 \cdot 100 \% = 47,1 \%$
Phi36	Менее 5	–		$S_{гидрофильн.}/S_{супергидрофильн.} = 26,6 / 73,4 \cdot 100 \% = 36,2 \%$
Phi28	Менее 5	–		$S_{гидрофильн.}/S_{супергидрофильн.} = 21,9 / 78,1 \cdot 100 \% = 28,0 \%$
Phi19	Менее 5	–		$S_{гидрофильн.}/S_{супергидрофильн.} = 16,0 / 84,0 \cdot 100 \% = 19,0 \%$
Phi13	Менее 5	–		$S_{гидрофильн.}/S_{супергидрофильн.} = 11,7 / 88,3 \cdot 100 \% = 13,3 \%$

Здесь θ_0 – измеренный контактный угол, °; θ_{roll} – угол скатывания, °; $S_{супергидрофоб.}$ – отношение площади поверхности, характеризующейся супергидрофобными свойствами к общей площади поверхности, %; $S_{супергидрофильн.}$ – отношение площади поверхности, характеризующейся супергидрофильными свойствами к общей площади поверхности, %; $S_{гидрофильн.}$ – отношение площади поверхности, характеризующейся гидрофильными свойствами к общей площади поверхности, %.

*Определены при температуре воздуха 22–24 °С, относительной влажности 40–45 %, атмосферном давлении.

Поверхности с условным обозначением Polished (таблица 2.3) использовались в качестве исходных (контрольных) образцов, обработаны методом механической шлифовкой абразивными материалами. Данный способ обработки широко применяется в промышленности для получения требуемых технологических поверхностей. Перед проведением экспериментов по испарению капель поверхности очищались в ультразвуковой ванне последовательно в изопропиловом спирте и ультрачистой воде при температуре 22–25 °С продолжительностью по 5 минут в каждой среде. Далее сушились в естественных условиях, соответствующих лабораторным не менее 24 часов.

Поверхности SHPhi (таблица 2.3) характеризуются супергидрофильными свойствами ($\theta_0 \approx 0$), изготовлены по апробированной методике [106] путем их обработки лазерным излучением наносекундной длительности. Модификация поверхностей осуществлялась с помощью системы на базе иттербиевого импульсного волоконного лазера (IPG Photonics) в воздушной среде при температуре 20–22 °С, атмосферном давлении, относительной влажности 43–48 %. На основе ранее проведенных исследований [106] выбраны параметры лазерного излучения, обеспечивающие формирование многомодальной шероховатости (текстуры): выходная мощность лазера 50 Вт, длительность излучения 120 нс, частота 20 кГц, энергия в импульсе 0,921 мДж. Скорость линейного перемещения луча лазера и количество линий прохода луча приняты 191 мм/с и 105 мм⁻¹, соответственно. После лазерной модификации поверхности подвергались очистке в ультразвуковой ванне последовательно в изопропиловом спирте и дистиллированной воде продолжительностью по 5 минут для удаления незакрепленных с поверхностью продуктов абляции.

Поверхности SHPho (таблица 2.3) характеризуются супергидрофобными свойствами ($\theta_0 \approx 168^\circ$), они изготовлены путем обработки поверхностей лазерным излучением и проведением последующих

процедур активации приповерхностного слоя к адсорбции гидрофобизирующего агента и термолита углеводородной жидкости. Методика формирования заданной многомодальной текстуры идентична методике, используемой и описанной выше при изготовлении поверхностей SHPhi.

Поверхности с комбинацией супергидрофильных/супергидрофобных свойств с условным обозначением Ext₁₆, Ext₂₃, Ext₃₁, Ext₄₁, Ext₅₄ изготовлены с использованием образцов, характеризующихся супергидрофобными свойствами SHPho ($\theta_0 \approx 168^\circ$), путем формирования на них участков с супергидрофильными свойствами ($\theta_0 < 5^\circ$). Супергидрофобные поверхности изготовлены по вышеописанной методике. Супергидрофильные участки формировались на супергидрофобной поверхности лазерным излучением по апробированной графо-аналитической методике [42,67,106], базирующейся на использовании геометрических размеров абляционного кратера. Характеристики лазерного излучения при создании супергидрофильных участков (таблица 2.4) определены по результатам специально проведенных экспериментов. Суть последних состояла в определении параметров лазерного излучения, достаточных для разрушения алкильных -CH₂- и -CH₃- групп, путем нагрева локальных участков до температуры 300–350 °С лазерным лучом, движущимся по заданной траектории, но исключая модификацию текстуры за счет процессов плавления и абляции. В условном обозначении данной группы поверхностей число в индексе (16, 23, 31, 41, 54) указывает на отношение площади поверхности, характеризующейся супергидрофобными свойствами, к аналогичной характеристике с супергидрофильными свойствами (таблица 2.3). Таким образом, разработана методика создания поверхностей АМГ-3 с комбинацией супергидрофильных/супергидрофобных свойств отличающаяся от известных, например [18,65,69,107], тем, что участки с различной смачиваемостью, но общей границей, характеризуются идентичными текстурами.

Таблица 2.4 – Характеристики лазерного излучения для формирования супергидрофильных областей, характеристики элементов текстуры поверхностей с комбинацией супергидрофильных/супергидрофобных свойств с условным обозначением

Условное обозначение	Характеристики лазерного излучения					Характеристики элементов текстуры	
	Частота, кГц	Длительность, нс	Мощность, %	Скорость перемещения луча лазера, мм/с	Количество линий на 1 мм	Размер супергидрофобной области, мкм	Межосевое расстояние супергидрофобных областей, мкм
Ext ₅₄	2	1	100	100	2,22	268 × 268	453
Ext ₄₁					2,00		497
Ext ₃₁					1,82		549
Ext ₂₃					1,54		640
Ext ₁₆					1,33		730

Поверхности с комбинацией супергидрофильных/гидрофильных свойств с условным обозначением Φ_{13} , Φ_{19} , Φ_{28} , Φ_{36} , Φ_{47} изготовлены путем формирования на полированной поверхности (Polished) микроканалов, боковые и нижняя стенки которых характеризуются развитой многомодальной шероховатостью. Помимо микроканалов текстура этой группы поверхностей состоит из микростолбиков. По периметру верхней поверхности микростолбиков сформировалась развитая многомодальная текстура, но поверхность не является обработанной лазерным излучением, но содержит продукты абляции. Микроканалы и участки по периметру верхней поверхности микростолбиков характеризуются супергидрофильными свойствами, а необработанная поверхность микростолбиков гидрофильными свойствами. В условном обозначении этой группы поверхностей число в индексе (13, 19, 28, 36, 47) указывает на отношение площади поверхности, характеризующейся гидрофильными свойствами, к площади поверхности с

супергидрофильными свойствами (таблица 2.3). В таблице 2.5 приведены характеристики лазерного излучения, а также элементов текстуры поверхностей с комбинацией супергидрофильных/гидрофильных свойств.

Таблица 2.5 – Характеристики лазерного излучения для формирования супергидрофильных областей и характеристики элементов текстуры поверхностей с комбинацией супергидрофильных/гидрофильных свойств

Условное обозначение	Характеристики лазерного излучения					Характеристики элементов текстуры	
	Частота, кГц	Длительность, нс	Мощность, %	Скорость перемещения луча лазера, мм/с	Число линий на 1 мм	Ширина и длина микростолбиков, мкм	Межосевое расстояние супергидрофобных областей (микростолбиков), мкм
Phi ₄₇	20	120	100	191,4	105	254 × 254	449
Phi ₃₆							492
Phi ₂₈							521
Phi ₁₉							635
Phi ₁₃							742

Смачиваемость поверхностей (таблица 2.3) определена методом анализа измеренного контактного угла и угла скатывания. Капля дегазированной дистиллированной воды объемом 5 мкл дозировалась на различные участки поверхностей. Контактный угол определен по теневым изображениям капли методом Юнга-Лапласа. Угол скатывания определялся путем наклона поверхности с каплей воды относительно горизонтальной плоскости с помощью гониометра GNL18/M (THORLABS). Ошибка при определении контактного угла и угла скатывания не превышала 5 %.

2.2.2 Контроль однородности шероховатости при независимом изменении смачиваемости

Анализ текстур поверхностей проведен с помощью СЭМ на Tescan Vega 3 SBU (Tescan). Исследования выполнялись в высоковакуумном режиме при ускоряющем напряжении 5 кВ. Использовался конфокальный лазерный сканирующий микроскоп OLYMPUS Lext OLS4100 (Olympus NDT). Данный прибор оснащен двойной конфокальной системой (Dual Confocal Laser System), которая обеспечивает высокую точность и воспроизводимость измерений за счет одновременного использования двух лазеров с разной длиной волны. Это позволяет исключить оптические шумы и получать данные с высокой вертикальной разрешающей способностью (менее 10 нм) даже для поверхностей со сложным рельефом и значительными перепадами высот. Измерения проводились с использованием двух объективов. Объектив 20x с полем зрения (FOV) 640×640 мкм. Данный объектив применялся для первичной оценки поверхности и статистического анализа шероховатости на протяженных участках. Сканирование выполнялось с шагом 0,2 мкм. Объектив 50x использовался для исследования морфологии поверхности на участках размером 256×256 мкм. Благодаря высокой апертуре ($NA = 0,95$) и увеличению 1080x данный объектив обеспечивает максимальное латеральное разрешение, необходимое для точного измерения параметров шероховатости на микроуровне. Шаг сканирования составлял 0,06 мкм. Для каждого участка проводилось построение трехмерной топографической карты поверхности и профилограмм. Полученные данные обрабатывались с использованием специализированного программного обеспечения OLS4100, которое включает функции устранения шумов, нивелирования наклона и фильтрации профиля в соответствии со стандартами ISO 4287 и ISO 25178 для вычисления трехмерных параметров шероховатости S_a , S_z и S_{dr} . Погрешность определения 3D параметров шероховатости не превышала 5 %.

2.2.3 Экспериментальный стенд для изучения процесса испарения капель на структурированных поверхностях

На рисунке 2.4 представлен оригинальный экспериментальный стенд, предназначенный для изучения процесса испарения капель теплоносителей на поверхностях теплообмена.

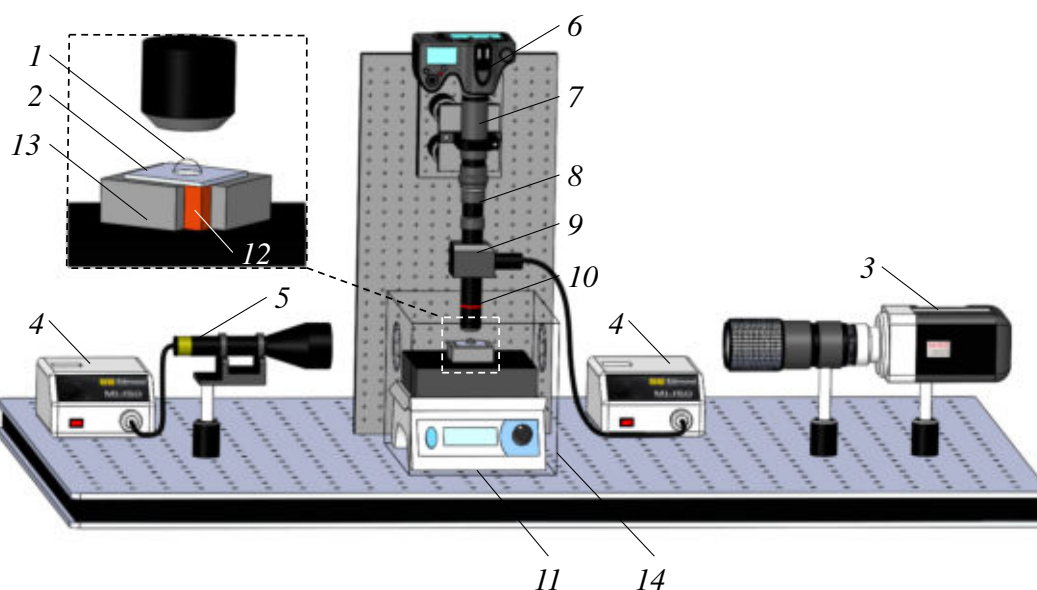


Рисунок 2.4 – Модель стенда для регистрации характеристик испарения капель на поверхностях: 1 – капля воды; 2 – образец с поверхностью теплообмена; 3 – высокоскоростная видеокамера, оснащенная объективом; 4 – источник плоскопараллельного света; 5 – телецентрическая оптическая труба; 6 – фотоаппарат; 7 – 2x F--адаптера; 8 – 6.5X трубки; 9 – корпус разветвителя светоканала; 10 – 4x объектив; 11 – стеклокерамическая плита; 12 – медный параллелепипед; 13 – теплоизоляция; 14 – бокс из полимерного стекла

Нагрев поверхностей до заданной температуры (начальное значение $T = 80 \text{ }^\circ\text{C}$, шаг варьирования $20 \text{ }^\circ\text{C}$, конечное значение $300 \text{ }^\circ\text{C}$) осуществлялся за счёт теплопроводности от источника, состоящего из стеклокерамической плиты ПЛ-01 и расположенного на ней медного параллелепипеда размерами

30,0 × 50,0 × 50,0 мм. Последний теплоизолирован вспененным каучуком ArmaFlex (толщина 15 мм, коэффициент теплопроводности 0,035 Вт/(м·К)). Термическое сопротивление в зонах контакта между плитой, параллелепипедом и пластиной из алюминиево-магниевого сплава (AlMg3) снижалось за счет нанесения высокотемпературной термопасты GRIPSCOOTT K-52 (теплопроводность 6,5 Вт/(м·К)). Неконтролируемое влияние конвективных воздушных потоков на процесс испарения капли исключалось путем размещения системы нагрева с пластиной АМГ-3 в боксе из полимерного стекла. Капля дистиллированной деаэрированной воды объемом 5 мкл с начальной температурой, соответствующей температуре окружающей среды в лаборатории (22–24 °С), дозировалась («садилась») одноканальным высокоточным электронным дозатором Thermo Fisher Scientific на поверхность образца, предварительно нагретую до заданной температуры. Предварительно проведена калибровка дозатора по указанной в инструкции методике. Предел допустимого относительного отклонения среднего арифметического значения фактического объема дозы от номинального составил ±5,0–2,0 %, а предел допускаемого относительного среднего квадратического отклонения фактического объема дозы при доверительной вероятности 0,95 составил 5,0–2,5 %. Полученные погрешности не превышают допустимые значения. Погрешность дозирования при проведении экспериментальных исследований составляла не более ±0,15 мкл, обеспечивая стабильную воспроизводимость дозирования капель. Игла дозатора позиционировалась в непосредственной близости от поверхности (на расстоянии ~1–2 мм). Капля контактировала с образцом под действием капиллярных сил и собственного веса. Начальная скорость капли была близка к нулю, а её кинетическая энергия пренебрежимо мала по сравнению с энергией поверхностного натяжения. В момент контакта с поверхностью капля сферической формы объёмом 5 мкл имела диаметр $2,1 \pm 0,2$ мм. После контакта её диаметр (контактный диаметр,

d) определялся балансом капиллярных сил и смачиванием конкретной поверхности, а также её температурой.

Геометрические размеры испаряющейся капли (объем (V), контактный диаметр (d), площадь поверхности капли (S), контактный угол (θ)) определялись по видеозаписям, полученным теневым оптическим методом с использованием оборудования оптической визуализации быстропротекающих процессов в составе высокоскоростной видеокамеры Phantom Miro M310, оснащенной объективом Nikon AF micro Nikkor 200 mm 1:4 D. Видеозапись осуществлялась при следующих характеристиках: разрешение 512×384 пикселей, частота видеозаписи 100 кадров в секунду. Плоскопараллельный свет генерировался светодиодным источником Edmund Optics 850 нм, оснащенный телецентрической оптикой, исключаяющей искажения краев капли. Видеокадры теневых изображений капель обрабатывались методом гониометрии Low-Bond Axisymmetric Drop Shape Analysis (LB-ADSA). Случайная погрешность определения времени испарения (τ), контактного угла и диаметра капли в условиях её испарения не превышала 5 %, объема и площади поверхности капли 8 %.

По полученным характеристикам определялась удельная скорость испарения (W) по выражению:

$$W = \frac{\rho \cdot (V_i - V_{i+1})}{\Delta \tau \cdot (S_i + S_{i+1}) / 2}, \text{ кг}/(\text{м}^2 \cdot \text{с}); \quad (2.2)$$

$$\Delta \tau = \tau_{i+1} - \tau_i, \quad (2.3)$$

где ρ – плотность жидкости, V_i , V_{i+1} , S_i , S_{i+1} – объем (м^3) и площадь поверхности (м^2) капли в момент времени τ_i и τ_{i+1} соответственно. Погрешность определения удельной скорости испарения не превышала 8 %.

Верхняя оптическая система визуализации быстропротекающих процессов использовалась для контроля геометрических характеристик капель, а также регистрации процессов зарождения, роста и разрушения пузырей в капле. Состоит из фотоаппарата Nikon D 7100, 2x F-адаптера, 6.5X трубки, монтажного блока для размещения светоделителя и дихроичного зеркала, 4x объектива.

Регистрация температуры поверхности пластины АМГ-3 («эффект охлаждения» поверхности) на толщине 500 мкм осуществлялась высокоточными малоинерционными микроразмерными термопарами типа К хромель-алюмель (диаметр спая 0,08 мм, изоляция PFA, погрешность 0,4 %). Под «эффектом охлаждения» поверхности понимается разница между температурой приповерхностного слоя до момента помещения капли и во время её испарения (ΔT). Необходимо отметить, что при определении «эффекта охлаждения» поверхности капля воды объемом 5 мкл дозировалась на поверхность в место расположения спая термопары, установленной в приповерхностном слое. Погрешность измерения температуры не превышала $\pm 0,1$ °С. Сигналы с термопар в режиме реального времени преобразовывались контроллером National Instruments 9213 и передавались на ПК с программным обеспечением LabVIEW для получения температурных трендов.

2.2.4 Методика PIV (Particle Image Velocimetry) для измерения скоростей внутренних течений в капле

Определение скорости конвективных потоков в испаряющейся капле осуществлялось по методике PIV с использованием стенда, приведенного на рисунке 2.4, при замене в верхней оптической системе фотоаппарата Nikon D7100 на высокоскоростную камеру Phantom Miro M310, а также при замене источника плоскопараллельного света (Edmund optics) на непрерывный твердотельный лазер с диодной накачкой серии KLM-532 A (длина волны – 532 нм, частота импульсов – не более 15 Гц). На рисунке 2.5 приведена модель экспериментального стенда по определению скорости конвективных потоков в испаряющейся капле (метод PIV) и характеристик температурного поля (метод PLIF).

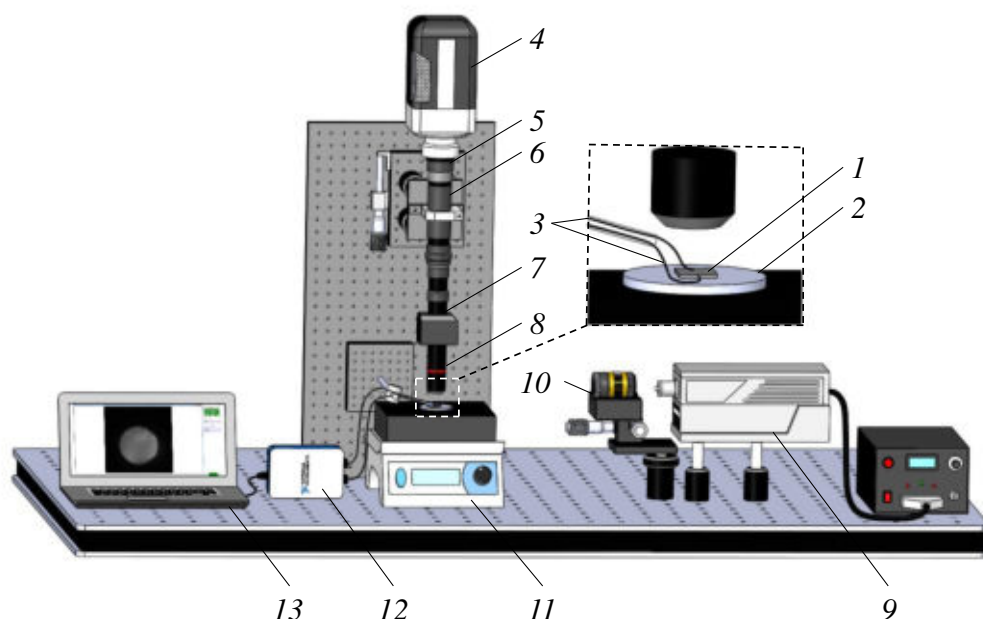
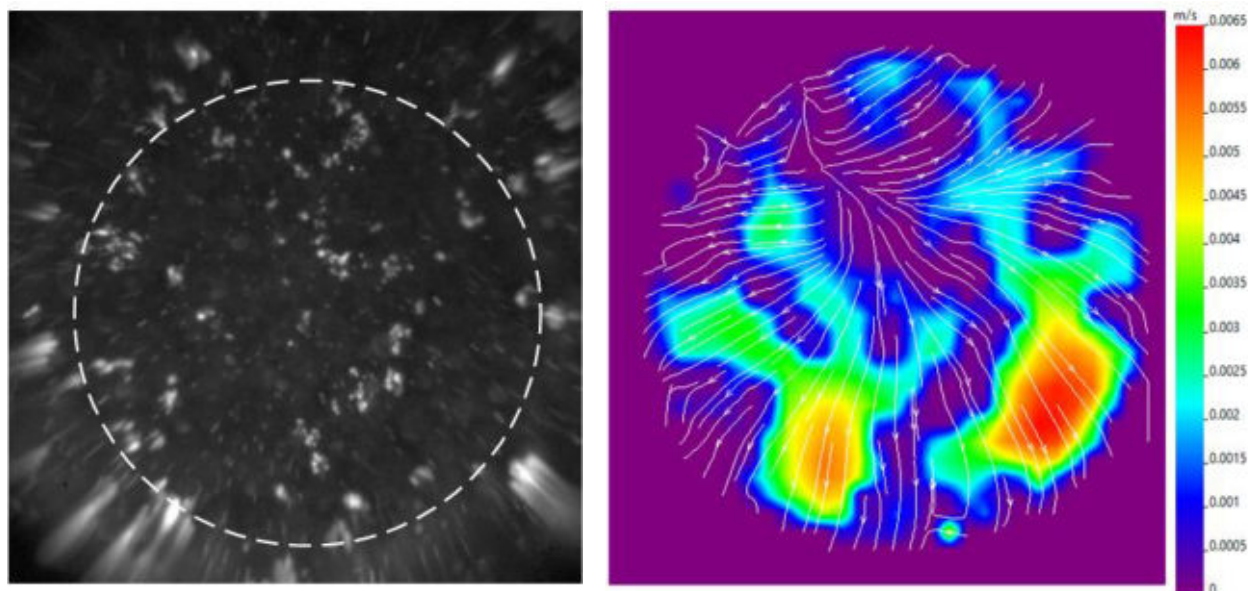


Рисунок 2.5 – Модель станда для определения скорости конвекции в испаряющейся капле (метод PIV и характеристик температурного поля (метод PLIF)): 1 – образец; 2 – медная подложка; 3 – высокоточные малоинерционные термопары; 4 – высокоскоростная видеокамера, оснащенная макрообъективом; 5 – светофильтр; 6 – 2x F-адаптера переходник; 7 – телецентрическая оптическая труба; 8 – 4x объектив; 9 – непрерывный одномодовый DPSS-лазер; 10 – линза для формирования светового ножа; 11 – стеклокерамическая плита; 12 – плата аналогового ввода; 13 – персональный компьютер

Фокусировка изображения камеры Phantom Miro M310 осуществлялась специализированным микропозиционером с точностью перемещения 1 мкм. Эксперименты проведены в идентичных и хорошо воспроизводимых условиях, соответствующих экспериментам, проводимым с верхней оптической системой до ее модернизации оборудованием PIV. Для реализации PIV метода в каплю воды добавлялись трассеры: частицы Fluoro-Max Red Fluorescent Polymer Microspheres 1 % vol. Solid (ThermoFisher Scientific) в концентрации 0,002 % об. Полученные фотоизображения в результате раскадровки видеозаписей обрабатывались в программном обеспечении Actual Flow (PIV Kit) (Сигма-Про). Типичные кадры,

демонстрирующие поля скоростей, представлены на рисунке 2.6. Погрешность определения средней скорости в измеряемом сечении капли не превышала 6 %.



(a)

(б)

Рисунок 2.6 – Типичные кадры, иллюстрирующие процесс обработки методом PIV: *a* – исходное изображение капли с трассерами непосредственно после ее помещения на нагретую поверхность (пунктирная линия – границы области обработки); *б* – итоговое изображение поля скоростей конвективных потоков с линиями токов, полученное для всего процесса прогрева и испарения капли

2.2.5 Методика PLIF (Planar Laser-Induced Fluorescence) для определения температурных полей в капле

Определение характеристик температурного поля (распределение температуры в капле, градиент температуры в капле, перепад температуры в капле, значения температуры в одном сечении в разные моменты времени) капли, испаряющейся на модифицированной поверхности металла, осуществлялось по методике PLIF с использованием основного

оборудования, описанного выше для методики PIV. Отличие реализации метода PLIF от метода PIV заключается в использовании флуорофора Rhodamine B в качестве трассеров с концентрацией $\gamma = 4000$ мкг/л, а также в методике проведения, алгоритме обработке данных и используемом программном обеспечении DaVis (LaVision Inc.).

Методика PLIF реализуется в два этапа. На первом выполняется калибровка системы измерения с помощью экспериментов, направленных на определение температуры свечения флуорофора при конкретных настройках лазерной системы подсветки, параметрах регистрации трассеров и внешних условиях. В предварительных экспериментах, при построении калибровочной кривой, интенсивность свечения флуорофора сопоставляется с показаниями температуры измеряемой термопарой (тип-S, диаметр соединения 0,05 мм, задержка 0,1 с, погрешность (β_{therm}) ± 1 °C). После калибровки любые изменения в конфигурации оборудования не допускаются. Результатом данного этапа является получение зависимости температуры воды от интенсивности свечения флуорофора (рисунок 2.7).

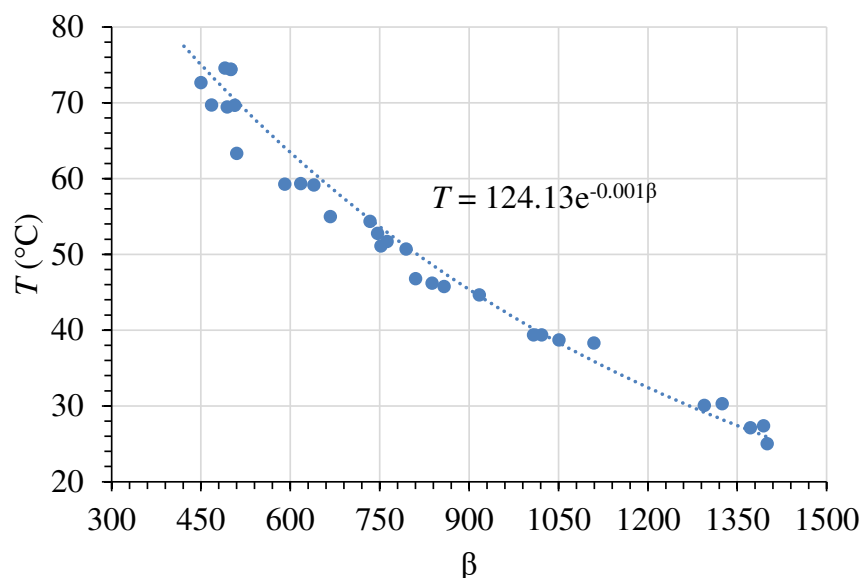


Рисунок 2.7 – Калибровочная кривая (для $\gamma_{in} \approx 4000$ мкг/л)

Погрешность калибровки обусловлена рядом факторов: погрешность измерения температуры с помощью термопар (β_{therm}); колебания

интенсивности свечения (β_{lum}); неравномерность распределения светимости лазерного ножа в капле (β_{laser}). Для расчета погрешности измерения температуры использовалась методика [108,109]. В соответствии с результатами расчетов $\beta_{lum} = 0,11 \text{ } ^\circ\text{C}$, $\beta_{laser} = 0,33 \text{ } ^\circ\text{C}$. Колебания интенсивности свечения могут возникать из-за фоновых шумов. Неравномерность распределения светимости лазерного ножа в капле вызвана постепенным рассеянием света при прохождении сквозь каплю и отражением от частиц флуорофора. Суммарная погрешность калибровки определяется по формуле:

$$\Delta T = \sqrt{\beta_{therm}^2 + \beta_{lum}^2 + \beta_{laser}^2} = 1,06 \text{ } ^\circ\text{C}, \quad (2.4)$$

где β_{therm} – погрешность измерения температуры с помощью термопар; β_{lum} – погрешность, обусловленная колебаниями интенсивности свечения; β_{laser} – погрешность, обусловленная неравномерностью распределения светимости лазерного ножа в капле.

Таким образом, погрешность калибровки составляет $\pm 1,06 \text{ } ^\circ\text{C}$. Значения температур, полученные с помощью метода PLIF, достоверны только в пределах построенной калибровочной кривой (рисунок 2.7) и в условиях, соответствующих условиям построения калибровочной кривой (условий окружающей среды, начальные параметры капель).

На втором этапе осуществляется регистрация температурного поля в заданном сечении капли. С помощью лазерного ножа капля рассекалась в горизонтальной плоскости, а полученные изображения сохранялись на ПК. Регистрация изображений капли выполнялась с частотой 50 кадров в секунду при разрядности камеры 16 бит. Последующая обработка и анализ изображений выполнялись в программном комплексе «DaVis». Для исключения влияния оптических искажений, связанных со сферичностью капли (таких как неравномерность поля светимости из-за переотражения лазерного излучения) и теневых эффектов от паровых пузырей (при их наличии), анализировалась только половина изображения капли. В процессе

анализа определялась интенсивность свечения флуорофора Rhodamine B (β) и строились температурные поля (рисунок 2.8). Для каждого режима проводились не менее трёх экспериментальных серий в идентичных начальных условиях. Полученные данные усреднялись в рамках каждой серии, после чего строились зависимости. Погрешность методики PLIF на этапах прогрева и стабилизации температуры не превышала $2\text{ }^{\circ}\text{C}$.

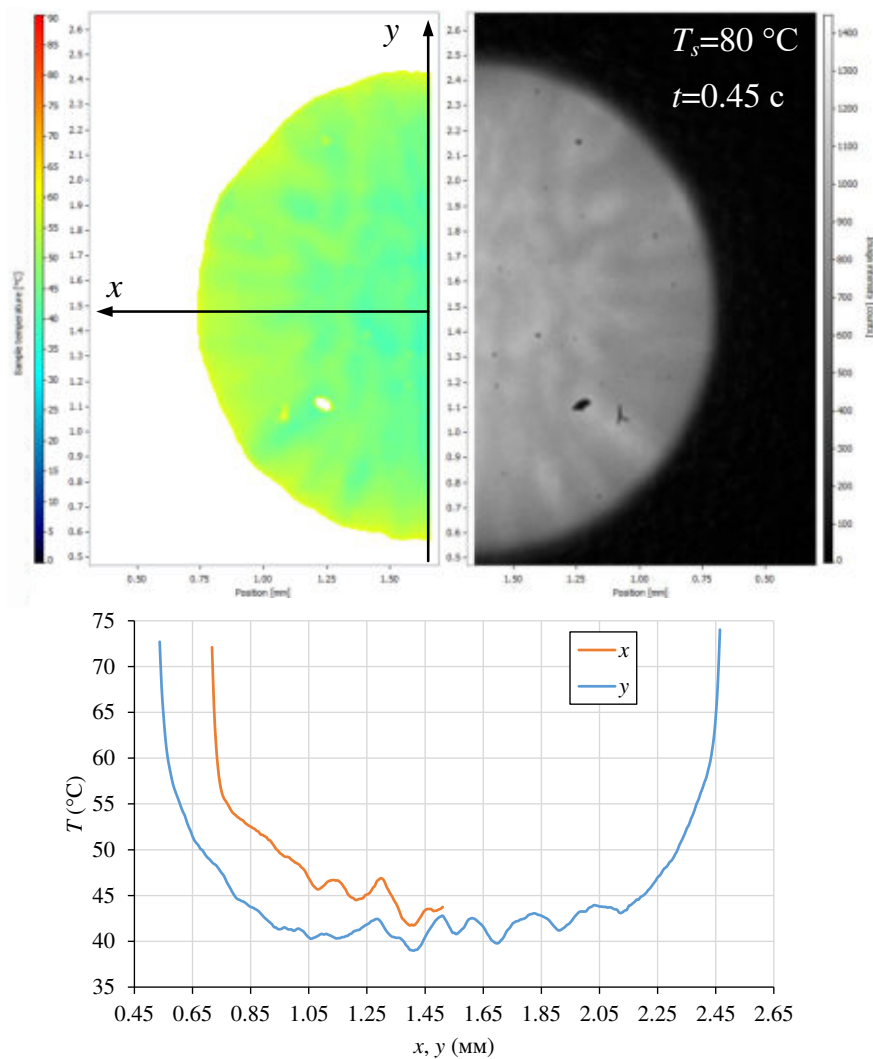


Рисунок 2.8 – Визуализация обработки видеок кадров при регистрации температурных полей капли воды в условиях контактного нагрева

2.2.6 Графоаналитический подход к оценке длины линии трёхфазного контакта

На сегодняшний день не существует стандартизированных и апробированных методик экспериментального измерения протяжённости линии трёхфазного контакта (ЛТК) под каплей на бифильных поверхностях. Для количественной оценки вклада ЛТК в охлаждение поверхностей, нагретых до температуры $80\text{ }^{\circ}\text{C}$, нами применен графоаналитический подход. Его суть заключается в расчёте суммарной длины границ раздела между супергидрофильными и супергидрофобными участками, находящимися непосредственно под проекцией капли. Методика учитывала случайный характер расположения капли относительно супергидрофобных участков. Для каждой поверхности серии Ext моделировалось пять сценариев расположения капли объемом 5 мкл. Например, для поверхности Ext₅₄ одно центральное (рисунок 2.9а) и четыре со смещением её проекции на 0,5 мм в различных направлениях (рисунок 2.9б – 2.9д). Для каждого сценария определялось число и конфигурация покрытых каплей супергидрофобных участков, после чего вычислялся суммарный периметр их границ с супергидрофильными участками.

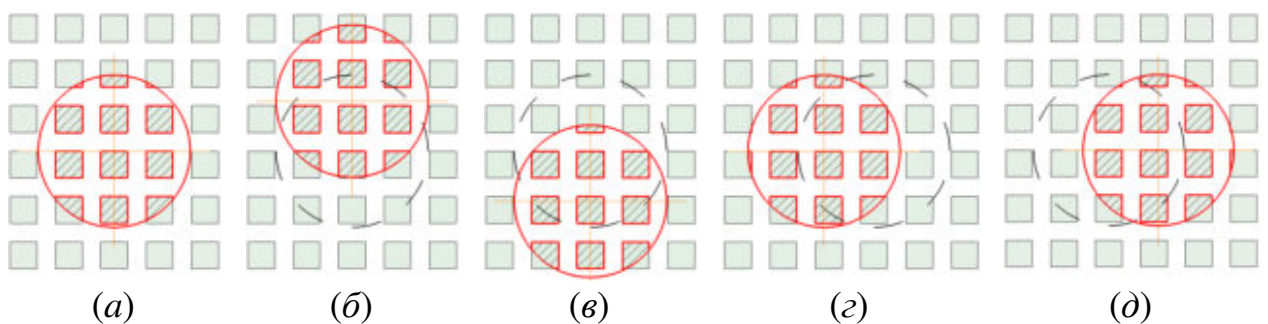


Рисунок 2.9 – Модель расположения капли 5 мкл на поверхности Ext₅₄ при температуре $80\text{ }^{\circ}\text{C}$: *a* – начальное (центральное) местоположение. Капля смещается на 0,5 мм относительно начального положения: *б* – в положительном направлении оси Y (вверх); *в* – в отрицательном направлении оси Y (вниз), *г* – в отрицательном направлении оси X (влево), *д* – в положительном направлении оси X (вправо). Красными линиями обозначены линии трёхфазного контакта; квадратами – супергидрофобные области на поверхности.

Выводы по второй главе

Разработан и экспериментально обоснован методический подход, обеспечивающий цикл исследований – от целенаправленного формирования заданной текстуры и смачиваемости поверхностей теплообмена до регистрации кинетики испарения капель теплоносителей и определения эффективности охлаждения.

Для преодоления ограничения широко применяемых методов диагностики (ИК-термография, поверхностные и подповерхностные датчики), не позволяющих оценить теплообмен в объеме материала, впервые предложена и реализована методика с использованием встроенных микротермопар, размещаемых непосредственно в приповерхностном слое поверхности теплообмена на глубине 500–600 мкм. Ее применение позволило экспериментально зарегистрировать и проанализировать динамику локального охлаждения под испаряющейся каплей, установив связь между характеристиками структурированной поверхности и эффективностью охлаждения.

На основе алюминиево-магниевых сплавов АМГ-2 и АМГ-3 с использованием наносекундной лазерной абляции реализован воспроизводимый способ изготовления структурированных поверхностей, включая супергидрофильные, супергидрофобные, LIS (с маслом и ПЭФ-350), а также бифильные структуры с контрастными свойствами смачивания. Впервые разработан и экспериментально реализован подход независимого контроля шероховатости и смачиваемости, суть которого заключается в последовательном применении лазерной абляции для формирования многомодальной текстуры, термолиза углеводородсодержащих жидкостей для гидрофобизации и локального лазерного нагрева до 300–350 °С для обратимого перевода в гидрофильное состояние при полном сохранении исходной текстуры. Это позволило разделить вклад шероховатости и смачиваемости поверхностей в процессы тепло- и массообмена при

испарении капель теплоносителя и создать принципиально новые типы бифильных поверхностей с заданным соотношением площадей зон экстремальной смачиваемости (от 13 % до 54 %) и идентичной микротекстурой.

Разработанный экспериментальный стенд, оснащенный оборудованием методов PIV и PLIF с высокоточной локальной термометрией, представляет собой новый методологический инструмент для пространственно-временного анализа полей скорости и температуры в динамически изменяющихся системах с фазовым переходом. Погрешности разработанных методик (измерение температуры в приповерхностном слое не более $\pm 0,1$ °С, дозирование капель до $\pm 0,01$ мкл, определение скоростей конвективных потоков не более 6 %, двумерных температурных полей до 2 °С, оценка параметров шероховатости не более 5–6 %, измерение контактных углов до $0,2^\circ$) находятся в пределах, полностью соответствующих современным требованиям к точности теплофизического эксперимента.

Совокупность представленных во второй главе методических решений является основой для изучения фундаментальных закономерностей теплоотвода за счет испарения капель теплоносителей по механизмам «термического» и «вторичного» распыления на структурированных поверхностях теплообмена.

ГЛАВА 3. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ АНАЛИЗ

В третьей главе приведены результаты, полученные с использованием методик и экспериментальных стендов, описанных во второй главе. Проведён анализ процесса испарения капли воды, расположенной на различных типах структурированных поверхностей: жидкостно-заполненными (LIS), с экстремальными свойствами смачивания (супергидрофильными и супергидрофобными) и бифильными поверхностями с контролируемым контрастом смачиваемости. Особое внимание уделено выявлению физических механизмов, определяющих эффективность теплообмена, включая различия между «термическим» и «вторичным» распылением капель, влияние пространственного распределения смачиваемости на внутренние конвективные течения в капле и локальную интенсивность теплоотвода.

Экспериментальные исследования охватывают широкий температурный диапазон от 80 °С до 300 °С, что позволило проследить эволюцию гидродинамических режимов испарения и установить границы применимости различных типов поверхностей. Применение современных методов диагностики – визуализации высокоскоростной съёмкой, измерения полей скоростей методом PIV и температурных полей методом PLIF, а также регистрации локального охлаждения приповерхностного слоя с помощью встроенных микротермопар – обеспечило комплексный подход к анализу процессов тепломассопереноса и позволило установить количественные связи между приповерхностными свойствами, гидродинамикой капли и интегральной эффективностью охлаждения. Полученные результаты формируют экспериментальную базу для разработки физически обоснованных рекомендаций по выбору оптимальных поверхностей теплообмена для различных температурных режимов работы энергонасыщенного оборудования.

3.1 Результаты исследования эффективности охлаждения поверхностей теплообмена за счет испарения капли теплоносителя при её распаде по механизмам «термического» и «вторичного» распыления

3.1.1 Анализ текстуры и механизмов взаимодействия капли теплоносителя с LIS-поверхностями

Текстура поверхности Al_p сформирована абразивными материалами, содержащими алмазный порошок, и войлочным полировочным диском. По СЭМ-изображениям на поверхности Al_p видны углубления (рисунок 3.1а), типичные размеры которых не превышают четырех микрометров, что сопоставимо с размером абразивных материалов, применяемых при полировке.

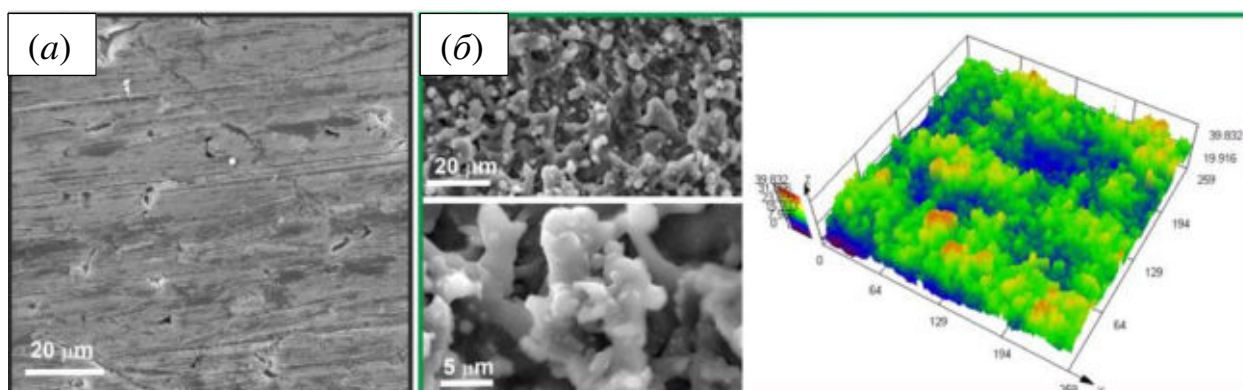


Рисунок 3.1 – СЭМ-изображения и оптические изображения текстур поверхностей, обработанных: *a* – абразивными материалами (Al_p);
б – лазерными излучением (Al_{phob})

Текстуры поверхностей Al_{phil} , Al_{phob} , Al_{phil}^{oil} , Al_{phob}^{oil} , Al_{phil}^{PEF} , Al_{phob}^{PEF} сформированы лазерным излучением при идентичных характеристиках лазерного излучения и условий окружающей среды. Поэтому текстура поверхностей Al_{phil} , Al_{phob} , Al_{phil}^{oil} , Al_{phob}^{oil} , Al_{phil}^{PEF} , Al_{phob}^{PEF} аналогична. На рисунке 3.1б приведены СЭМ-изображения и оптические изображения

типичной текстуры, сформированной лазерным излучением. Из рисунка 3.1б видно, что такая текстура характеризуется развитой, многомодальной шероховатостью. Можно сделать вывод о том, что приповерхностный слой алюминиевого сплава, модифицированный лазерным излучением, является пористым. Последнее является необходимым требованием для создания двумерных LIS [24]. Из таблицы 3.1 видно, что 3D-параметры шероховатости близки по значениям для обработанных лазерным излучением поверхностей Al_{phil} , Al_{phob} , Al_{phil}^{oil} , Al_{phob}^{oil} , Al_{phil}^{PEF} , Al_{phob}^{PEF} . Последнее свидетельствует о подобии текстур.

Таблица 3.1 – 3D-параметры шероховатости поверхностей

Поверхность	Sa, мкм	Sz, мкм	Sdr, %
Al_p	0,32±0,01	3,13±0,06	0,8±0,02
Al_{phil}	3,82±0,08	35,90±0,72	212,7±6,4
Al_{phob}	3,61±0,07	36,21±0,72	216,1±6,5
Al_{phil}^{oil}	3,78±0,08	35,81±0,72	209,1±6,3
Al_{phob}^{oil}	3,81±0,08	35,99±0,72	210,6±6,3
Al_{phil}^{PEF}	3,69±0,07	36,30±0,73	212,2±6,4
Al_{phob}^{PEF}	3,90±0,08	35,13±0,70	228,3±6,8

Среднее значение параметра Sz для поверхностей, обработанных лазерным излучением, составило 35,9±0,4 мкм. Это значение характеризует толщину модифицированного пористого слоя, на которую проникает смазка при изготовлении LIS поверхностей. В проводимых исследованиях спай термопары диаметром 13 мкм размещался в приповерхностном слое образца на расстоянии 600 мкм от поверхности в специально изготовленном углублении диаметром около 85 мкм (рисунок 2.2). Так как модификация приповерхностного слоя лазерным излучением осуществляется на глубину не более 37 мкм (таблица 3.1), с учетом размеров чувствительного элемента

термопары можно сделать вывод о том, что спай термопары размещен в слое не подверженном модификации. По этим причинам в условиях дозирования капли воды на поверхность с модифицированным приповерхностным слоем исключалось охлаждение спая термопары водой, которая за счет капиллярных сил могла проникать до места расположения термопары.

По результатам анализа значений параметра Sdr сделан вывод о том, что за счет текстуры, сформированной лазерным излучением, произошел прирост площади поверхности более чем в два раза по сравнению с аналогичной характеристикой для поверхности, обработанной абразивными материалами (полированной). Безусловно прирост площади поверхности за счет шероховатости (текстуры) может интенсифицировать процесс испарения капли теплоносителя, если теплоноситель будет контактировать с поверхностью. В данных условиях теплоперенос реализуется по кондуктивному механизму. В таких условиях чем больше поверхность теплообмена, тем интенсивнее осуществляется передача теплоты к капле. Но даже если теплообмен между каплей и поверхностью будет происходить через паровую прослойку при относительно высоких температурах нагрева, то произойдет интенсификация теплообмена. Так как удельная площадь нагретой поверхности под левитирующей каплей в состоянии Лейденфроста будет выше, чем аналогичная характеристика в условиях испарения на полированной поверхности.

Известна модель [38], прогнозирующая пять возможных механизмов взаимодействия капли теплоносителя с LIS (рисунок 3.2).

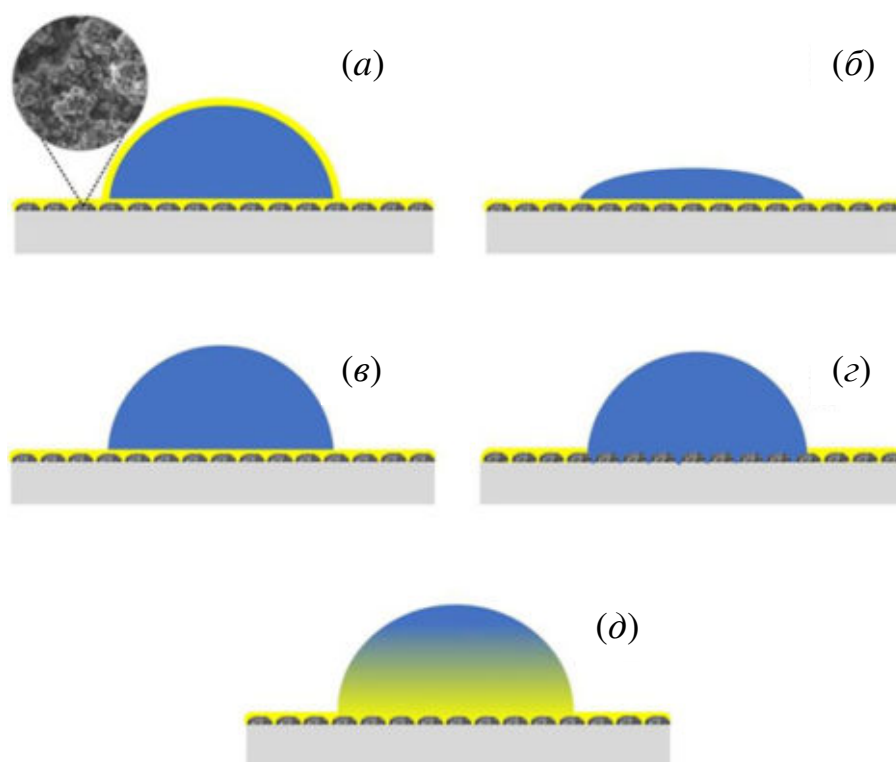


Рисунок 3.2 – Схематическое представление механизмов взаимодействия капли теплоносителя с LIS, где: *a* – капля теплоносителя покрывается тонким слоем смазки. Осуществляется наложение «маски» [38]; *б* – капля теплоносителя растекается тонким слоем по слою смазки; *в* – капля теплоносителя формируется в виде шарового сегмента на слое смазки; *г* – капля теплоносителя вытесняет смазку и формируется в виде шарового сегмента на поверхности; *д* – капля теплоносителя и смазки смешиваются, формируется капля в форме шарового сегмента на поверхности смазки

Модель [38] основана на поверхностном натяжении теплоносителя (γ_d), поверхностном натяжении смазочного материала (γ_l), межфазном поверхностном натяжении «теплоноситель–смазка» (γ_{dl}), а также составляющих поверхностного натяжения (Лифшица–Ван-дер-Ваальса γ^{LW} и кислотно-основной γ^{AB} , состоящей из кислотной γ^+ и основной γ^-). В модели [38] используются критерии, выполнение которых свидетельствует о реализации одного из возможных механизмов взаимодействия капли теплоносителя с LIS (рисунок 3.2):

1. $S_{ld} > 0$. Если коэффициент растекания S_{ld} положителен, то капля теплоносителя покрывается тонким слоем смазки. Осуществляется наложение «маски» (рисунок 3.2а).

2. $S_{dl} > 0$. Если коэффициент растекания S_{dl} положителен, то капля теплоносителя растекается тонким слоем по слою смазки (рисунок 3.2б).

3. $S_{ls} + \gamma_l \cdot R < 0$. Если значение $S_{ls} + \gamma_l \cdot R$ отрицательно, то капля теплоносителя формируется в виде шарового сегмента на слое смазки (рисунок 3.2в).

4. $S_{ls(d)} + \gamma_{dl} \cdot R < 0$. Если значение $S_{ls(d)} + \gamma_{dl} \cdot R$ отрицательно, то капля теплоносителя вытесняет смазка и формируется в виде шарового сегмента на поверхности (рисунок 3.2г).

5. $\gamma_{dl} < 0$. Если межфазное поверхностное натяжение «теплоноситель–смазка» отрицательно, то капля теплоносителя и смазка смешиваются, формируется капля в форме шарового сегмента на поверхности смазки (рисунок 3.2д).

Значения коэффициентов растекания и межфазное поверхностное натяжение «теплоноситель–смазка» определяются как [38]:

$$S_{ld} = \gamma_d - (\gamma_{dl} + \gamma_l) = -2\gamma_l^{LW} - 4\sqrt{\gamma_l^+ \gamma_l^-} + 2\sqrt{\gamma_d^+ \gamma_l^-} + 2\sqrt{\gamma_l^+ \gamma_d^-} + 2\sqrt{\gamma_d^{LW} \gamma_l^{LW}}; \quad (3.1)$$

$$S_{dl} = \gamma_l - (\gamma_{dl} + \gamma_d) = -2\gamma_d^{LW} - 4\sqrt{\gamma_d^+ \gamma_d^-} + 2\sqrt{\gamma_d^+ \gamma_l^-} + 2\sqrt{\gamma_l^+ \gamma_d^-} + 2\sqrt{\gamma_d^{LW} \gamma_l^{LW}}; \quad (3.2)$$

$$S_{ls} + \gamma_l R = \gamma_s - (\gamma_{ls} + \gamma_l) + \gamma_l R = -2\gamma_l^{LW} + 2\sqrt{\gamma_l^{LW} \gamma_s^{LW}} - 2\sqrt{\gamma_l^+ \gamma_l^-} + 2\sqrt{\gamma_l^+ \gamma_s^-} + 2\sqrt{\gamma_s^+ \gamma_l^-} + (R - 1)(\gamma_l^{LW} + 2\sqrt{\gamma_l^+ \gamma_l^-}); \quad (3.3)$$

$$S_{ls(d)} + \gamma_{dl} R = \gamma_{ds} - (\gamma_{ls} + \gamma_{dl}) + \gamma_{dl} R = \gamma_d^{LW} - 2\sqrt{\gamma_d^{LW} \gamma_s^{LW}} + 2\sqrt{\gamma_d^+ \gamma_d^-} - 2\sqrt{\gamma_d^+ \gamma_s^-} - 2\sqrt{\gamma_s^+ \gamma_d^-} - \gamma_l^{LW} + 2\sqrt{\gamma_l^{LW} \gamma_s^{LW}} - 2\sqrt{\gamma_l^+ \gamma_l^-} + 2\sqrt{\gamma_l^+ \gamma_s^-} + 2\sqrt{\gamma_s^+ \gamma_l^-} + (R - 1) \left(\gamma_d^{LW} + \gamma_l^{LW} - 2\sqrt{\gamma_d^{LW} \gamma_l^{LW}} + 2\sqrt{\gamma_d^+ \gamma_d^-} + 2\sqrt{\gamma_l^+ \gamma_l^-} - 2\sqrt{\gamma_d^+ \gamma_l^-} - 2\sqrt{\gamma_l^+ \gamma_d^-} \right); \quad (3.4)$$

$$\gamma_{dl} = \gamma_d^{LW} + \gamma_l^{LW} - 2\sqrt{\gamma_d^{LW} \gamma_l^{LW}} + 2\sqrt{\gamma_d^+ \gamma_d^-} + 2\sqrt{\gamma_l^+ \gamma_l^-} - 2\sqrt{\gamma_d^+ \gamma_l^-} - 2\sqrt{\gamma_l^+ \gamma_d^-}. \quad (3.5)$$

По результатам выполненной оценки установлено (таблица 3.2), что выполняется условие $S_{ld} > 0$ (первый критерий). Следовательно, в условиях осаждения капли воды на LIS, пропитанных маслом ($Al_{fil}^{oil}, Al_{fob}^{oil}$) и ПЭФ-350 ($Al_{fil}^{PEF}, Al_{fob}^{PEF}$), реализуются условия формирования «маски» (рисунок 3.2a).

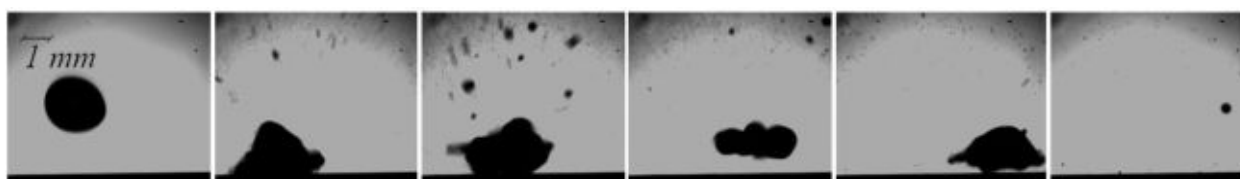
Таблица 3.2 – Результаты оценки критериев, характеризующих механизмы взаимодействия капли теплоносителя с LIS

Поверхность	Критерии		
	$S_{ld} > 0$	$S_{dl} > 0$	$\gamma_{dl} < 0$
Al_{fil}^{oil}	2,9	-75,9	36,5
Al_{phob}^{oil}	2,9	-75,9	36,5
Al_{phil}^{PEF}	2,89	-105,1	51,1
Al_{phob}^{PEF}	2,89	-105,1	51,1

Значения критериев $S_{ls(d)} + \gamma_{dl} \cdot R < 0$ и $S_{ls(d)} + \gamma_{dl} \cdot R < 0$ не приведены. Последнее обусловлено тем, что известные методы и подходы определения составляющих поверхностной энергии твердых поверхностей, в том числе и метод ван Осс-Чодхури-Гуд модель (vOCG) [110], позволяют определить надежные и адекватные значения составляющих поверхностной энергии только для молекулярно-гладких поверхностей. Поверхности, используемые в настоящих исследованиях, характеризуются большой шероховатостью (таблица 3.2).

Известно [111], что для реализации «вторичного распыления» бинарной капли, состоящий из несмешивающихся компонентов, необходима реализация условий, при которых низкокипящий компонент находился бы внутри капли, а поверхность капли должна быть покрыта высококипящим компонентом. В проводимых экспериментах вода является низкокипящим компонентом, смазка высококипящим. При осаждении капли воды на LIS, формируется капля бинарной жидкости. Вода покрывается тонким слоем

смазочного материала, выполняется условие для реализации «вторичного» распыления (рисунок 3.2а, таблица 3.1). При этом исключается «термическое» распыление, так как капля воды не взаимодействует с твердой нагретой поверхностью. На рисунке 3.3 приведены типичные кадры видеogramм реализации «термического» распыления и «вторичного» распыления капли воды в условиях её испарения на поверхностях, используемых в экспериментах, при температуре нагрева 160 °С.



а



б



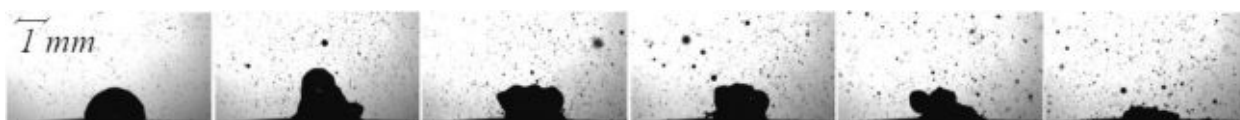
в



г



д



е

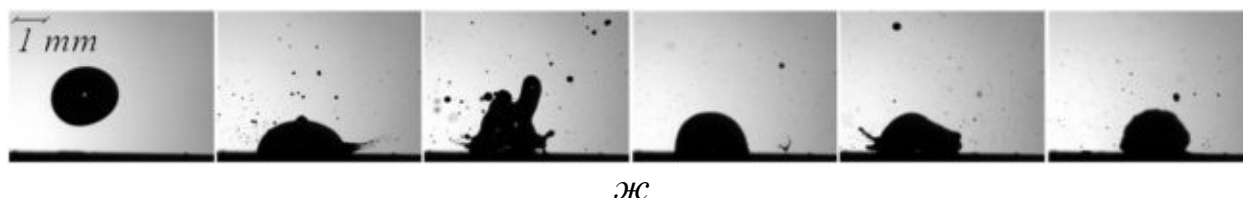


Рисунок 3.3 – Типичные кадры видеogramм реализации «термического распыления» и «вторичного распыления». «Термическое распыление» на поверхности: $a - Al_p$; $б - Al_{phil}$; $в - Al_{phob}$. «Вторичное распыление» на поверхности: $г - Al_{phil}^{oil}$; $д - Al_{phob}^{oil}$; $е - Al_{phil}^{PEF}$; $ж - Al_{phob}^{PEF}$

Из рисунка 3.3 видно, что гидродинамические режимы взаимодействия капли с поверхностью и характеристики распада «родительской капли» на более мелкие вторичные капли при реализации «термического» распыления (рисунок 3.3а, 3.3б, 3.3в) и «вторичного» распыления (рисунок 3.3е, 3.3ж) различны. По результатам анализа видеogramм процесса испарения капель сделаны выводы о том, что при испарении капель на поверхности Al_p и поверхностях с экстремальными свойствами смачивания (Al_{phil} , Al_{phob}) реализуются последовательно хорошо известные гидродинамические режимы [95]: «осаждение капли» – «танец» – «отскок» – «термическое распыление» при температурах нагрева от 120 °С до состояния Лейденфроста [26]. При взаимодействии капли с LIS реализуются гидродинамические режимы «осаждение капли» – «вторичное» распыление. За счет наличия тонкого слоя смазки на поверхности не реализуются гидродинамические режимы «танец» и «отскок», а распад «родительской капли» осуществляется по механизму «вторичного» распыления.

3.1.2 Оценка эффективности охлаждения при «термическом» и «вторичном» распылении капли теплоносителя

Различие в характеристиках распада «родительской капли» при реализации «термического» распыления и «вторичного» распыления подтверждается экспериментальными данными по среднему размеру (d_{av}) и числу формирующихся вторичных капель (N_l – число «крупных капель»; N_s – число «капель малого размера»), приведёнными на рисунках 3.4–3.7. Также существенное различие между «термическим» распылением и «вторичным» распылением проявляется в характерных временах задержек (τ) до реализации распада «родительской капли» (рисунок 3.8).

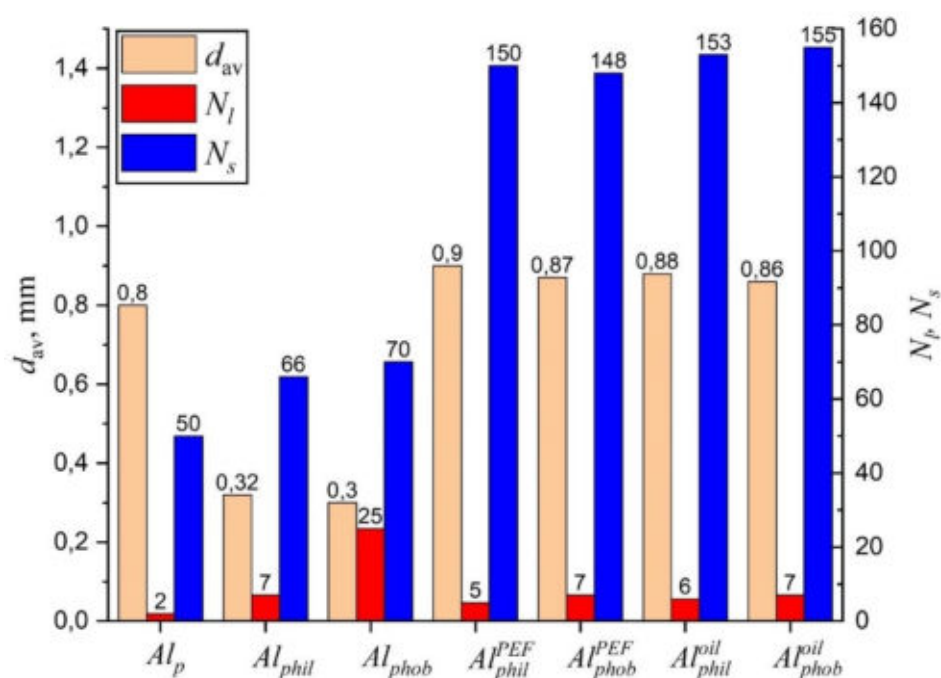


Рисунок 3.4 – Средний размер вторичных капель (d_{av}), число «крупных капель» (N_l), число «капель малого размера» (N_s) формирующихся на полированной поверхности (Al_p), поверхностях с экстремальными свойствами смачивания (Al_{phil} , Al_{phob}) и LIS (Al_{phil}^{oil} , Al_{phob}^{oil} , Al_{phil}^{PEF} , Al_{phob}^{PEF}) при температурах нагрева поверхностей 160 °С

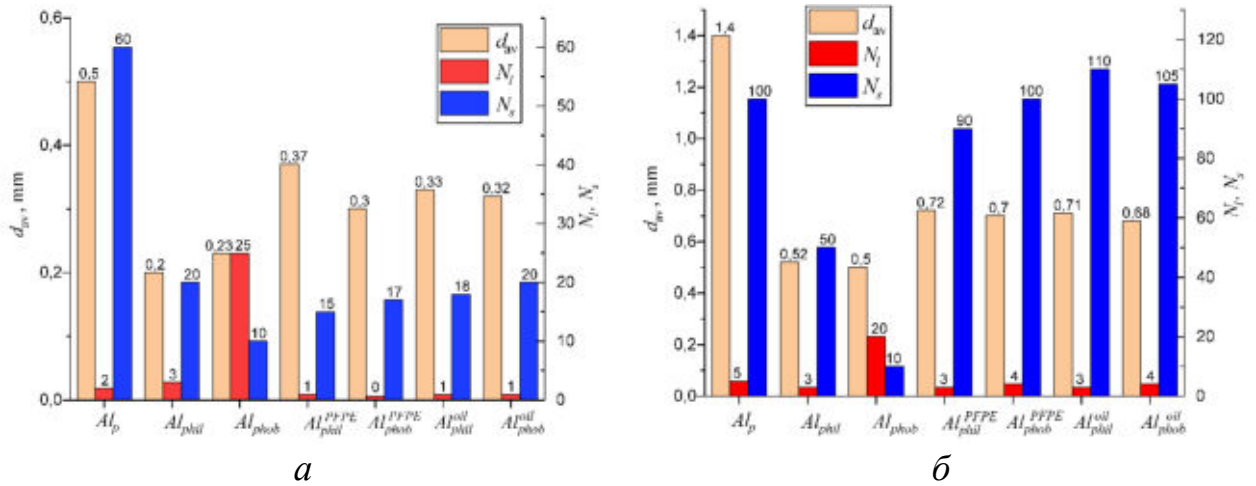


Рисунок 3.5 – Средний размер вторичных капель (d_{av}), число «крупных капель» (N_l), число «капель малого размера» (N_s) формирующихся на полированной поверхности (Al_p), поверхностях с экстремальными свойствами смачивания (Al_{phil} , Al_{phob}) и LIS (Al_{phil}^{oil} , Al_{phob}^{oil} , Al_{phil}^{PFPE} , Al_{phob}^{PFPE}) при температурах нагрева поверхностей: a – 120 °С, b – 140 °С

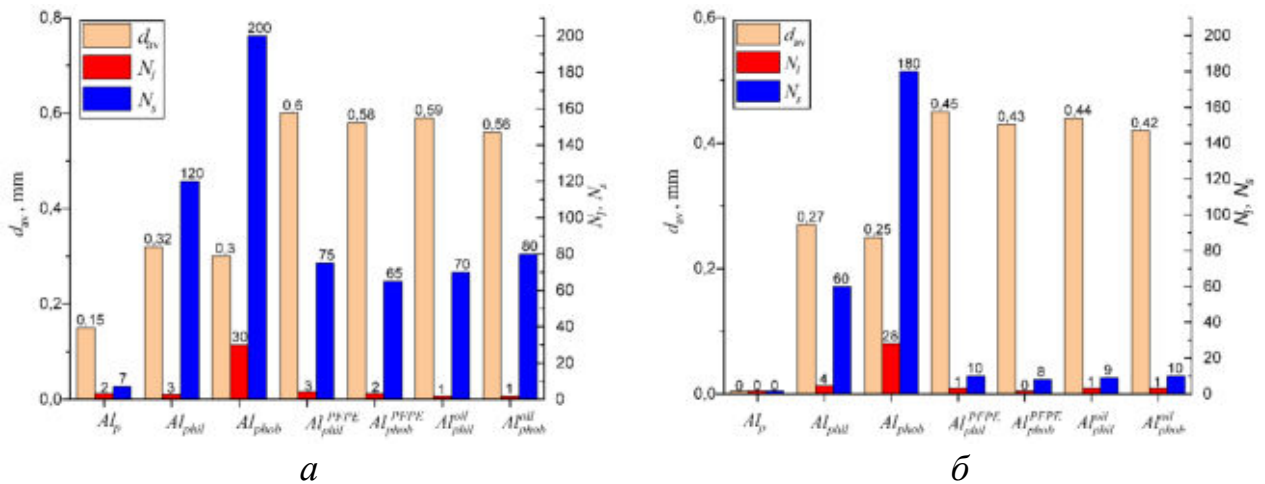


Рисунок 3.6 – Средний размер вторичных капель (d_{av}), число «крупных капель» (N_l), число «капель малого размера» (N_s) формирующихся на полированной поверхности (Al_p), поверхностях с экстремальными свойствами смачивания (Al_{phil} , Al_{phob}) и LIS (Al_{phil}^{oil} , Al_{phob}^{oil} , Al_{phil}^{PFPE} , Al_{phob}^{PFPE}) при температурах нагрева поверхностей: a – 180 °С, b – 200 °С

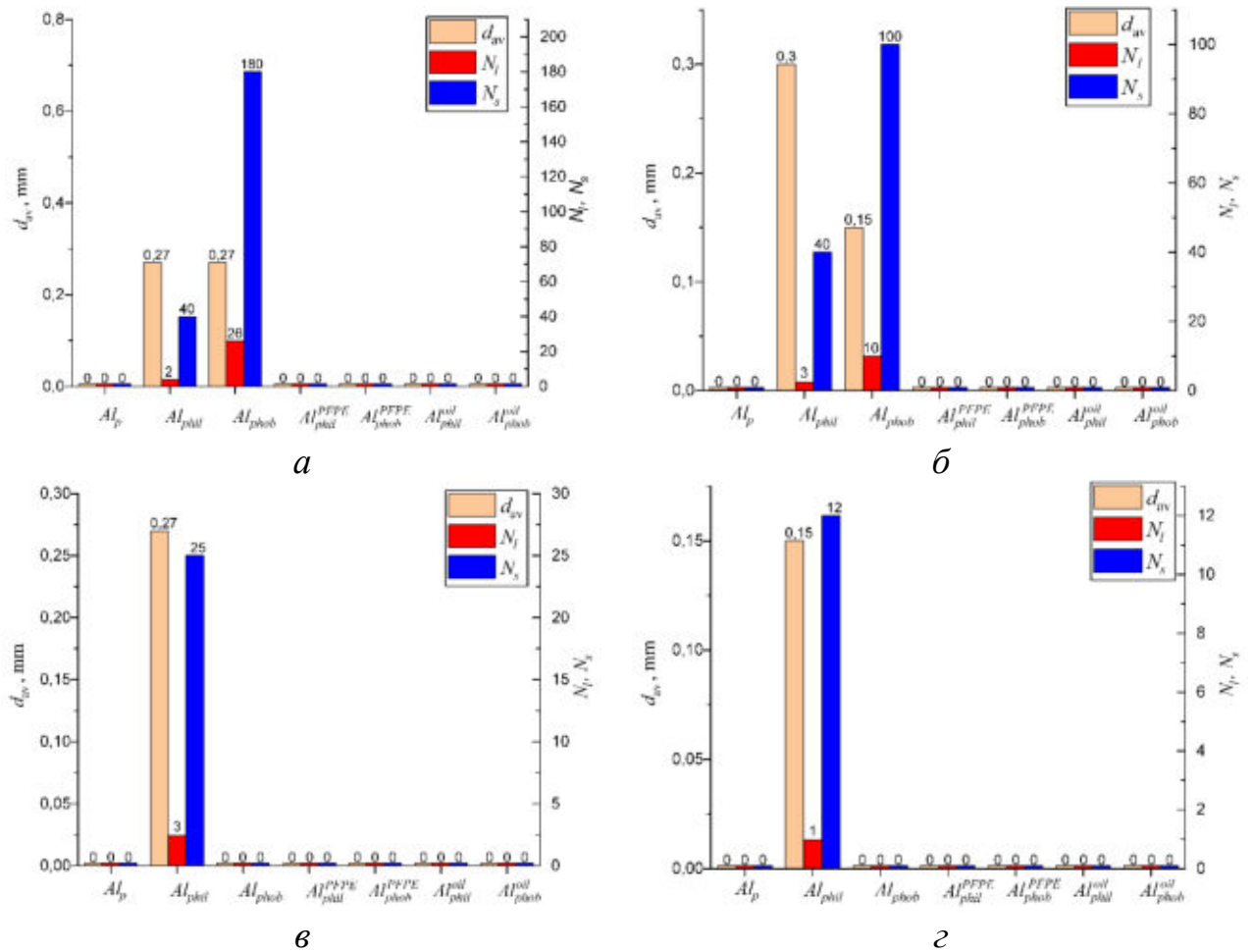


Рисунок 3.7 – Средний размер вторичных капель (d_{av}), число «крупных капель» (N_l), число «капель малого размера» (N_s) формирующихся на полированной поверхности (Al_p), поверхностях с экстремальными свойствами смачивания (Al_{phil} , Al_{phob}) и LIS (Al_{phil}^{oil} , Al_{phob}^{oil} , Al_{phil}^{PEF} , Al_{phob}^{PEF}) при температурах нагрева поверхностей: *а* – 220 °C; *б* – 240 °C; *в* – 260 °C; *г* – 280 °C

По результатам анализа размеров вторичных капель выделено две группы капель. Зарегистрированные вторичные капли размером более 0,1 мм, отнесены к группе «крупных капель», а размером менее 0,1 мм, отнесены к группе «капель малого размера». На рисунках 3.4–3.7 приведены усредненные значения среднего размера «крупных капель». Используемое экспериментальное оборудование не позволяло получить достоверные размеры капель менее 0,1 мм, в отличие от их числа (N_s). По результатам анализа рисунков 3.4–3.7 установлено, что средний размер вторичных капель

больше на полированной поверхности Al_p , чем на поверхностях с экстремальными свойствами смачивания (Al_{phil} , Al_{phob}). На полированной поверхности Al_p наибольший средний размер вторичных капель 1,4 мм зарегистрирован при температуре нагрева поверхности 140 °С. При увеличении температуры поверхности размеры формирующихся вторичных капель становятся меньше. При температуре поверхности Al_p более 180 °С реализовывался кризис теплообмена (эффект Лейденфроста), распад «родительской капли» (формирование вторичных капель) прекращалось. Меньший размер капель, формирующихся на поверхностях с экстремальными свойствами смачивания (Al_{phil} , Al_{phob}), чем на поверхности Al_p , обусловлен более шероховатой текстурой.

Из рисунков 3.4–3.7 видно, что на поверхностях Al_{phil} , Al_{phob} средний размер вторичных капель близок по значениям. Характеристики шероховатости поверхностей Al_{phil} , Al_{phob} аналогичны (таблица 3.1), но свойства смачивания сильно различны (супергидрофильные и супергидрофобные). Можно сделать следующие выводы о том, что при реализации «термического» распыления размер формирующихся вторичных капель охлаждаемого теплоносителя зависит от шероховатости поверхности и не зависит от смачивания этой поверхности. Чем выше шероховатость поверхности, тем размер вторичных капель меньше. На поверхностях с экстремальными свойствами смачивания (Al_{phil} , Al_{phob}) наибольшие размеры вторичных капель 0,5 мм, так же, как и на полированной поверхности Al_p зарегистрированы при температуре 140 °С. При дальнейшем увеличении температуры поверхностей Al_{phil} , Al_{phob} размеры вторичных капель становятся меньше. Необходимо отметить, что кризис теплообмена (эффект Лейденфроста) на поверхности Al_{phil} реализуется при температурах нагрева более 280 °С. Кризис теплообмена сместился в область более высоких температур за счет формирования текстуры и супергидрофильных свойств [1].

Известно [93], что ухудшение смачивания приводит к смещению температур кризиса теплообмена в область более низких температур, то есть на поверхности Al_{phob} кризис теплообмена должен был реализоваться при температуре менее 180 °С. Последнее должно было бы сопровождаться высокой подвижностью капли по поверхности за счет формирования парового зазора [112] между каплей и поверхностью и отсутствием диспергирования капли на более мелкие фрагменты. Однако по результатам проведенных экспериментов установлено, что капля воды на супергидрофобной поверхности перестает диспергировать на более мелкие вторичные капли только при температурах нагрева поверхности более 240 °С (рисунки 3.5–3.7). То есть на поверхности Al_{phob} устойчивый кризис теплообмена сместился в область более высоких температур относительно поверхности Al_p . Последнее мы объясняем относительно существенной шероховатостью поверхности Al_{phob} (таблица 2.2). Вероятно, кризис теплообмена на поверхности Al_p реализуется при температурах менее 180 °С, под каплей формируется паровой зазор и капля начинает перемещаться по поверхности, но по траектории своего движения за счет существенной шероховатости капля зацепляется за выступы шероховатости. В результате последнего реализуется «термическое» распыление при столкновении капли с выступом шероховатости. Вероятно, что в области более высоких температур поверхности толщина парового зазора между каплей теплоносителя и поверхностью будет больше. При температурах более 240 °С толщина парового зазора была достаточной для преодоления барьеров в виде выступов. По этим причинам при температурах нагрева поверхности Al_{phob} более 240 °С зарегистрировано состояние Лейденфроста.

На LIS наибольшие размеры вторичных капель 0,9 мм, зарегистрированы при температуре нагрева поверхности 160 °С (рисунки 3.4–3.7). Следовательно, можно сделать вывод о том, что наибольшие размеры вторичных капель при «вторичном» распылении формируются при более высоких температурах нагрева, чем при

«термическом» распылении. Также из рисунков 3.4–3.7 видно, что размеры вторичных капель при «вторичном» распылении больше, чем на существенно шероховатых поверхностях с экстремальными свойствами смачивания Al_{phil} , Al_{phob} , но меньше, чем на полированной поверхности Al_p . Слой смазки на LIS формирует поверхность близкую по характеристикам шероховатости к идеально гладкой. При этом размеры вторичных капель при диспергировании «родительской капли» меньше, чем на полированной, которая не является идеально гладкой поверхностью. Причинами формирования вторичных капель при реализации «вторичного» распыления и «термического» распыления является разрушение паровых пузырей. Различие в размерах вторичных капель на поверхностях Al_p и LIS свидетельствует о различии в механизмах формирования пузырей и характеристиках их разрушения при реализации «вторичного» распыления и «термического» распыления. Также по результатам анализа рисунков 3.4–3.7 можно сделать выводы о том, что смачиваемость основы LIS явно не влияет на размеры вторичных капель. Состав смазок ПЭФ-350 и масла также не оказали явного влияния на размеры вторичных капель на LIS.

Установлено (рисунки 3.4–3.7), что число формирующихся вторичных капель от температуры нагрева поверхностей имеет зависимость параболического вида с ветвями, направленными вниз. На полированной поверхности наибольшее число вторичных капель зарегистрировано при 140 °С, на супергидрофильной и супергидрофобной при 180 °С, на LIS при 160 °С (рисунки 3.4–3.7). Наибольшее же число вторичных капель зарегистрировано на супергидрофобной поверхности из используемых в экспериментах (таблица 2.1). По результатам анализа рисунков 3.4–3.7 можно сделать выводы, что чем выше шероховатость и хуже смачиваемость поверхностей тем, больше число вторичных капель образуется при диспергировании «родительской капли». Установлено, что смачиваемость основы LIS, а также характеристики ПЭФ-350 и масла не оказывают явного влияния на число вторичных капель. При температурах нагрева LIS более

200 °С вторичное распыление не реализовывалось. Последнее обусловлено тем, что при температурах более 200 °С на поверхностях LIS реализовывалось состояние Лейденфроста. Шаг изменения температуры поверхности в проводимых экспериментах составлял 20 °С. При таком шаге явных различий в температурах возникновения кризиса теплообмена на LIS не установлено. Можно сделать вывод о том, что смачиваемость основы LIS и характеристики смазки (ПЭФ-350 и масло) не значительно влияют на реализацию состояния Лейденфроста. Но необходимо отметить, что на LIS состояние Лейденфроста реализовывалось при более высоких температурах нагрева поверхности, чем на полированной. Но при меньших температурах, чем на поверхностях с экстремальной смачиваемостью.

Из рисунка 3.8 видно, что времена задержки диспергирования «родительской капли» с ростом температуры поверхностей нагрева уменьшаются. Такая зависимость характерна для всех поверхностей, используемых в экспериментах кроме поверхности, характеризующейся супергидрофобными свойствами Al_{phob} . При использовании поверхности Al_{phob} зарегистрирован рост τ при температурах нагрева от 140 °С до 180 °С. При дальнейшем увеличении температуры поверхности зависимость $\tau = f(T)$ выходит на плато. Такое поведение $\tau = f(T)$ при использовании поверхности Al_{phob} можно объяснить тем, что при температурах 140 °С реализуются условия состояния Лейденфроста, но толщина парового зазора не позволяет преодолеть выступы шероховатости, как отмечалось выше. Капля, не преодолев выступ, прекращает движение, диспергирует по механизму «термического» распыления. Паровой зазор характеризуется высоким термическим сопротивлением, по этой причине, увеличивается характерное время подвода требуемой теплоты к капле для реализации «термического» распыления в диапазоне температур от 140 °С до 180 °С. Сформулирована гипотеза о том, что при росте температуры нагрева поверхности Al_{phob} от 140 °С до 180 °С существенно увеличивается толщина парового зазора, но её все же недостаточно для преодоления выступов шероховатости. При

температурах от 180 °С до 240 °С рост толщины парового зазора менее существен, кроме того, могут реализовываться условия, при которых количество теплоты, подводимой к капле, при увеличении температуры подавляется ростом толщины парового зазора. По этим причинам зависимость $\tau = f(T)$ для Al_{phob} выходит на плато в диапазоне температур от 180 °С до 240 °С (рисунок 3.8).

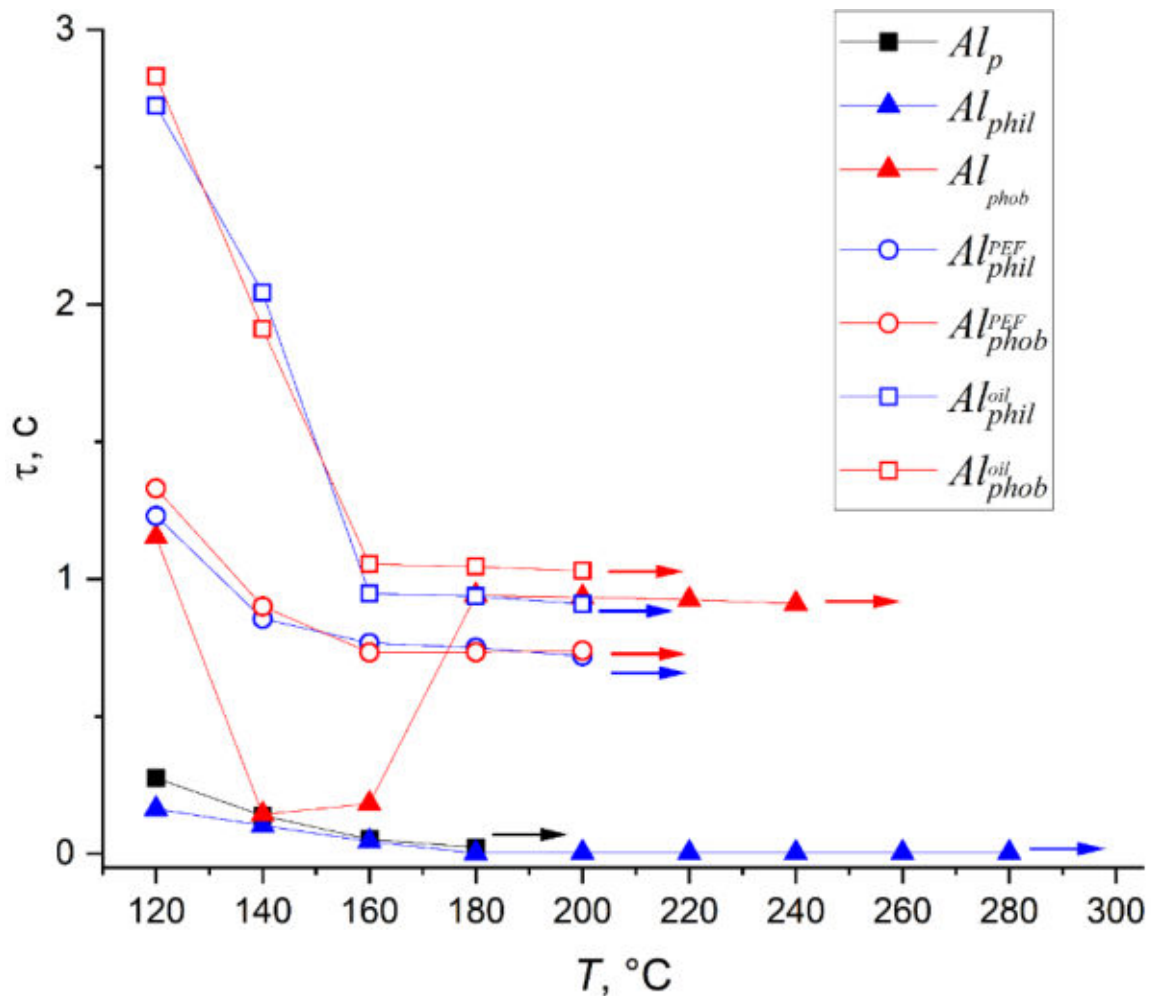


Рисунок 3.8 – Зависимости времени задержки диспергирования «родительской капли» от температуры полированной поверхности (Al_p), поверхностях с экстремальными свойствами смачивания (Al_{phil} , Al_{phob}) и LIS (Al_{phil}^{oil} , Al_{phob}^{oil} , Al_{phil}^{PEF} , Al_{phob}^{PEF}). Стрелками указаны границы возникновения кризиса теплообмена (состояние Лейденфроста)

Также из рисунка 3.8 видно, что времена задержки диспергирования «родительской капли» на поверхностях LIS (Al_{phil}^{oil} , Al_{phob}^{oil} , Al_{phil}^{PEF} , Al_{phob}^{PEF}) существенно больше, чем на Al_p и Al_{phil} , Al_{phob} . Последнее свидетельствует о различии в механизмах диспергирования родительской капли по «термическому» распылению (поверхности Al_p и Al_{phil} , Al_{phob}) и «вторичному» распылению (поверхности LIS).

Установлено (рисунок 3.8), что чем лучше смачиваемость, тем время задержки до реализации распада «родительской капли» меньше. Последнее обусловлено тем, что площадь растекания капли воды на поверхностях с лучшим смачиванием больше, следовательно, высота капли меньше и времена прогрева капли до условий «термического» распыления уменьшаются.

Также установлено (рисунок 3.8), что от свойств смазочного материала зависит время задержки до реализации распада «родительской капли», а от смачивания основы LIS не зависят. Времена задержки LIS, пропитанных жидкостью ПЭФ-350, меньше аналогичных характеристик LIS, пропитанных маслом. Сформулирована гипотеза о том, что последнее обусловлено тем, что жидкость ПЭФ-350 является строго дисперсионной, отсутствует полярная составляющая в поверхностном натяжении (таблица 2.2, раздел 2.1.3) в отличие от масла. Основопологающим фактором «вторичного» распыления капли воды (полярной жидкости) в условиях реализации «маски» (рисунок 3.3а) на LIS является взаимная нерастворимость теплоносителя (воды) (полярной жидкости) и смазки (дисперсионной жидкости). «Вторичное» распыление капель на LIS реализуются только при условии, что в поверхностном натяжении капли теплоносителя, взаимодействующей с LIS, преобладает полярная составляющая (теплоноситель должен быть полярной жидкостью $\gamma^{AB}/\gamma^{LW} > 1,0$), а в поверхностном натяжении смазочного материала должна преобладать дисперсионная составляющая (смазка должен быть дисперсионной жидкостью $\gamma^{LW}/\gamma^{AB} \leq 0,1$). То есть «вторичное» распыление

капель на LIS реализуются только при условии взаимной нерастворимости теплоносителя и смазки. Слабые связи (ван-дер-ваальсовых взаимодействий) характеризуются дисперсионной составляющей поверхностного натяжения. Полярная составляющая поверхностного натяжения характеризует сильные связи между молекулами (водородные, ионные, ковалентные, диполь-дипольные). Так как в поверхностном натяжении масла присутствует полярная составляющая, то связи между молекулами воды и масла более сильные, чем воды и ПЭФ-350. Паровой пузырь на LIS формируется на поверхности раздела жидких компонентов, входящих в состав взаимно нерастворимой смеси. Теплота, подводимая к капле, будет обеспечивать рост центров парообразования на межкомпонентной поверхности раздела, «схлопывание» которых при выполнении предельных условий приводит к «вторичному» распылению. Так как поверхностное натяжение масла содержит полярную составляющую, то связи между водой и маслом более сильные, чем между водой и ПЭФ-350. Следовательно, для формирования парового пузыря его роста и разрушения в системе масло/вода требуется больше подвода теплоты, чем в условиях системы ПЭФ-350/вода. Эксперименты проведены в идентичных условиях подвода теплоты, следовательно, различие во временах задержек LIS, пропитанных жидкостью ПЭФ-350 и маслом, обусловлены различием требуемого количества подводимой теплоты для реализации «вторичного» распыления. В случае системе масло/вода требуется больше теплоты для реализации «вторичного» распыления, чем для системы ПЭФ-350/вода.

На рисунке 3.9 представлен «эффект охлаждения», оцененный по снижению температуры на расстоянии 600 мкм от поверхности теплообмена при размещении на нее капли теплоносителя (воды). Эксперименты проводились в диапазоне температур от 100 °С до 280 °С. По результатам анализа полученных данных (рисунок 3.9) условно выделены диапазоны температур нагрева поверхностей (от 100 °С до 180 °С и от 180 °С до 280 °С) в которых определен наилучший «эффект охлаждения».

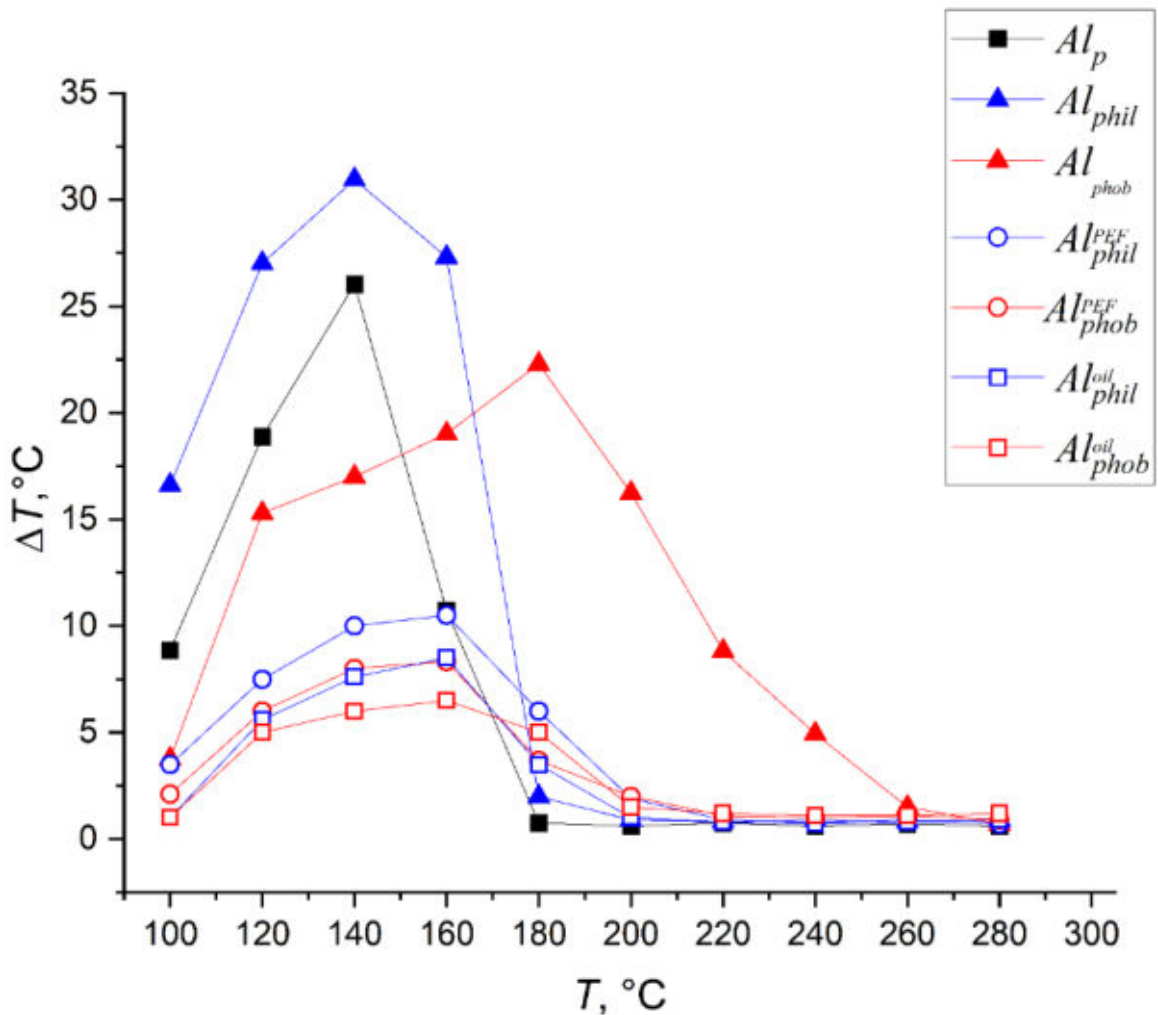


Рисунок 3.9 – «Эффект охлаждения» (изменение температуры поверхности) на расстоянии 600 мкм от поверхности в результате взаимодействия с каплей воды объемом 10 мкл. Поверхности: Al_p – полированная;

Al_{phil} , Al_{phob} – с экстремальными свойствами смачивания; Al_{phil}^{oil} , Al_{phob}^{oil} ,

Al_{phil}^{PEF} , Al_{phob}^{PEF} – LIS

В диапазоне от 100 °C до 180 °C наилучшее охлаждение, а следовательно, и наилучший теплоотвод за счет осаждения на поверхность капли воды объемом 10 мкл зарегистрирован на поверхности с супергидрофильными свойствами Al_{phil} . Далее в диапазоне температур нагрева от 100 °C до 180 °C по эффективности теплоотвода располагаются поверхности полированная Al_p и супергидрофобная Al_{phob} . Необходимо

напомнить, что шаг нагрева температур поверхностей составлял 20 °С. Из рисунка 3.9 видно, что наибольшее уменьшение температуры для поверхностей Al_{phil} и Al_p происходит при температурах нагрева поверхности до 140 °С. От дозирования капли воды на поверхность Al_{phil} уменьшение температуры составило 32,5 °С, а на поверхность Al_p – 26,5 °С. Но при температурах нагрева 160 °С на поверхности Al_p происходит существенное снижение эффективности теплоотвода. При температурах нагрева Al_p более 180 °С характерно устойчивое состояние Лейденфроста в результате охлаждения поверхности осуществляется не более, чем на 1,5 °С. На поверхности Al_{phil} при температуре нагрева 160 °С охлаждение более существенно, составило 27 °С. Но при температурах нагрева более 180 °С, также происходит снижение эффективности охлаждения (не более 2 °С). Последнее обусловлено гидродинамическими режимами испарения капель на супергидрофильных поверхностях. Капля воды не находится в состоянии Лейденфроста до температур более 280 °С, но за счет существенной шероховатости и супергидрофильных свойств в диапазоне температур от 180 °С до 280 °С капля воды на Al_{phil} испаряется с реализацией отскока от поверхности и последующем кратковременным осаждением на поверхность с реализацией диспергирования. При этом вторичные капли характеризуются мылами размерами и малым числом (рисунки 3.5–3.7), что не приводит к отводу теплоты от поверхности.

В условно выделенном диапазоне температур нагрева от 180 °С до 280 °С наилучшее охлаждение зарегистрировано на супергидрофобной поверхности Al_{phob} . При нагреве поверхности Al_{phob} до 180 °С охлаждение от капли воды составило 22 °С. При более высоких температурах нагрева поверхности Al_{phob} эффективность теплоотвода снижается, но все же остается достаточно существенна до 240 °С.

LIS продемонстрировали низкую эффективность охлаждения как в условно выделенном диапазоне температур от 100 °С до 180 °С, так и при

температурах нагрева поверхностей от 180 °С до 280 °С. Наибольшее уменьшение температуры поверхностей Al_{phil}^{oil} , Al_{phob}^{oil} , Al_{phil}^{PEF} , Al_{phob}^{PEF} от дозирования капли воды зарегистрировано при нагреве 160 °С. Из рисунка 3.9 видно, что состав смазочного материала и смачиваемость основы LIS влияют на интенсивность теплоотвода при капельном охлаждении. Поверхность Al_{phil}^{PEF} среди LIS продемонстрировала наилучшее охлаждение, поверхность Al_{phob}^{oil} наихудшее. Так как времена прогрева до инициации диспергирования «родительской капли» воды на поверхностях, пропитанных ПЭФ-350 меньше, чем на поверхностях, пропитанных маслом (рисунок 3.9), можно предположить, что «эффект охлаждения» зависит от времени задержки диспергирования. Чем больше время задержки, тем до более высокой температуры прогреется капля воды. Испарение капли воды не происходит до диспергирования, так как она покрыта слоем смазки. Охлаждение поверхности (теплоотвод от неё) осуществляется при реализации диспергирования капли воды на LIS. Влияние же смачивания основы LIS на «эффект охлаждения» обусловлено тем, что при диспергировании «родительской» капли воды происходит унос смазочного материала. При значительном уносе смазки капля воды может взаимодействовать с поверхностью. За счет супергидрофильных свойств основы LIS вода под действием капиллярных сил проникает в приповерхностный модифицированный слой и реализуется более существенное охлаждение поверхности, чем на LIS с супергидрофобной основой, на которой вода не проникает в приповерхностных слой.

По результатам анализа «эффекта охлаждения» на исследуемых поверхностях можно заключить следующее. В диапазоне температур нагрева до 160 °С наиболее предпочтительными с точки зрения практического применения являются супергидрофильные поверхности, позволяющие наиболее эффективно реализовать теплоотвод при капельном охлаждении по механизму «термического» распыления. Поверхности, текстура которых получена традиционным и широко используемым методом обработки

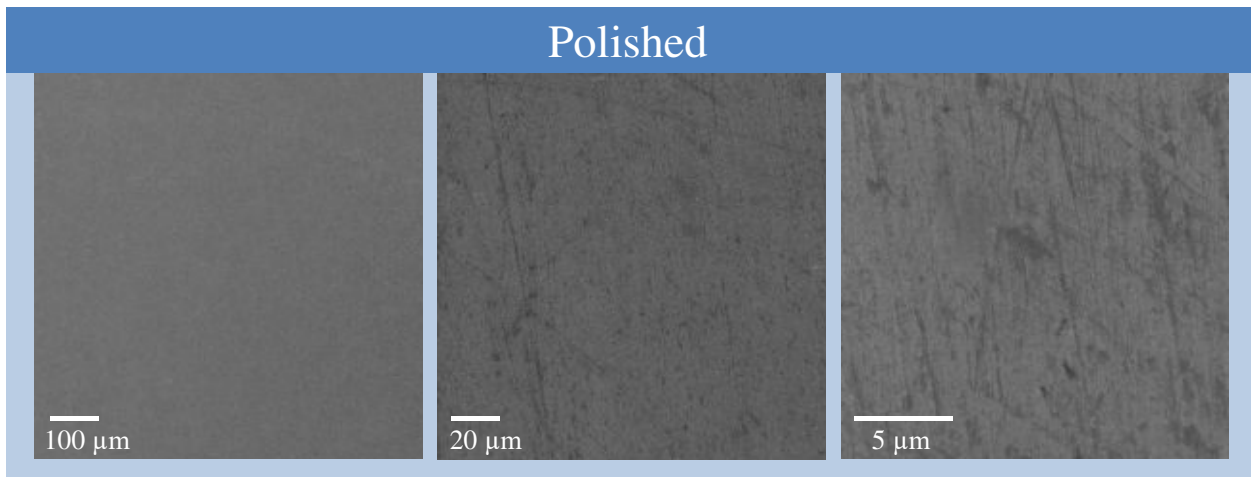
(шлифовка, полировка), имеют малый рабочий диапазон температур до 140 °С. Дальнейшее увеличение температуры нагрева приводит к реализации эффекта Лейденфроста, поверхность практически не охлаждается, что может привести к выходу из строя охлаждаемого оборудования.

Супергидрофобные поверхности целесообразно использовать в диапазоне высоких температур от 180 °С до 240 °С, так как их охлаждение каплями воды более существенно по механизму «термического» распыления. С учетом того, что рабочий диапазон температур у гидрофильных и гидрофобных поверхностей разный, интерес для будущих исследований представляет создание и использование бифильных поверхностей, которые комбинируют свойства как гидрофильных, так и гидрофобных участков. LIS-поверхности на которых реализуется механизм «вторичного» распыления показали наихудшее охлаждение из исследуемых поверхностей, несмотря на то, что кризис теплообмена на этих поверхностях реализуется при более высоких температурах нагрева, чем на полированных поверхностях. При этом, состав смазки и смачивание основы LIS-поверхностей оказывает влияние на значение понижения температуры при капельном охлаждении по механизму «вторичного» распыления. Но в условиях нагрева таких поверхностей до высоких температур, происходит деградация их свойств за счет уноса смазочного материала. Поэтому их использование для систем охлаждения нецелесообразно.

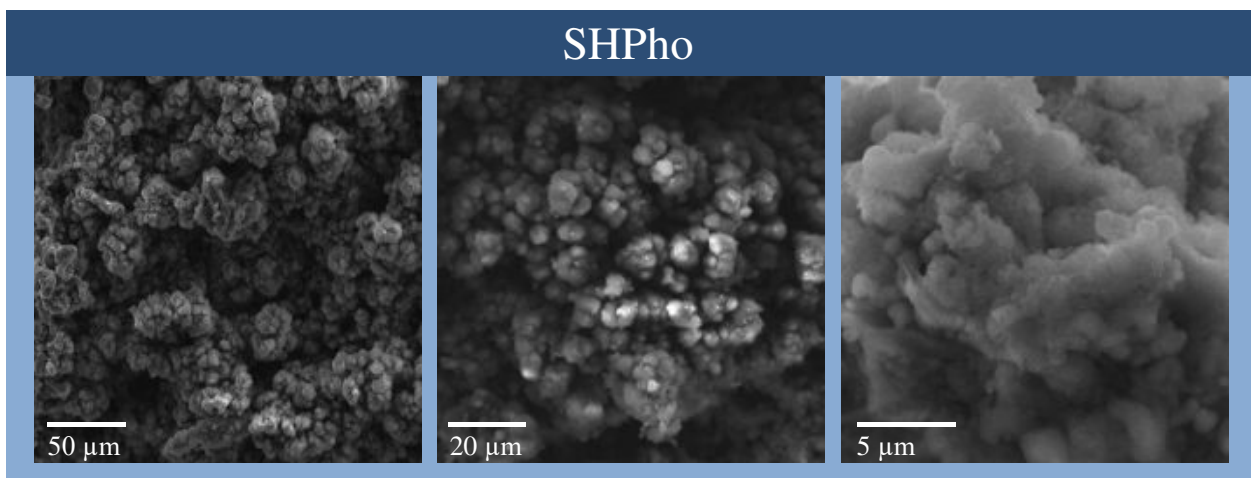
3.2 Результаты исследования испарения капли, расположенной на структурированных поверхностях с контрастным смачиванием

3.2.1 Анализ однородности текстуры при локальном изменении смачиваемости

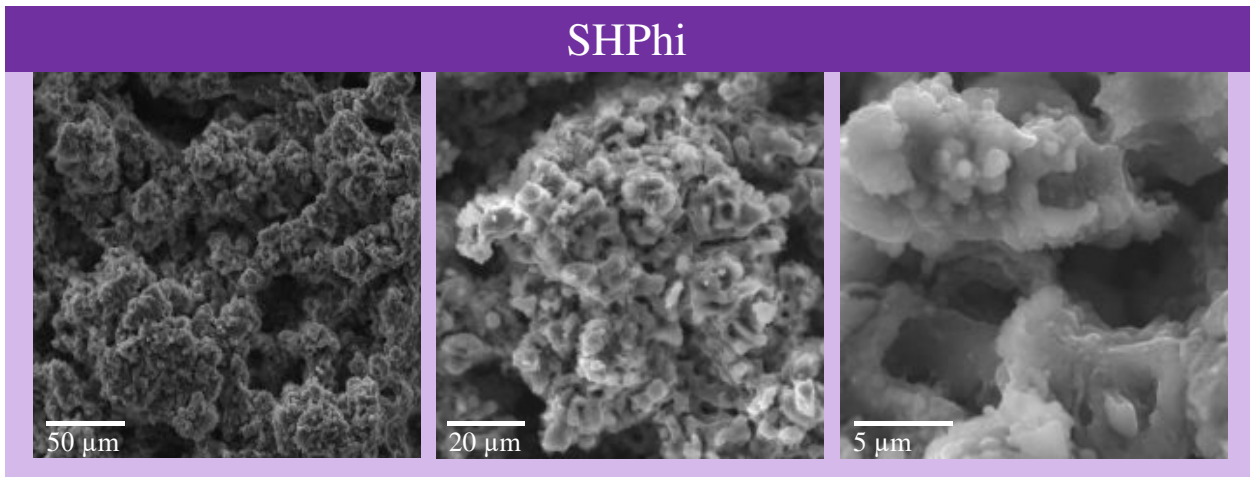
Анализ текстуры проводился методом сканирующей электронной микроскопии по фотоизображениям высокого разрешения, полученных с помощью электронного микроскопа (Tescan Mira 3). Типичные СЭМ-изображения приведены на рисунке 3.10.



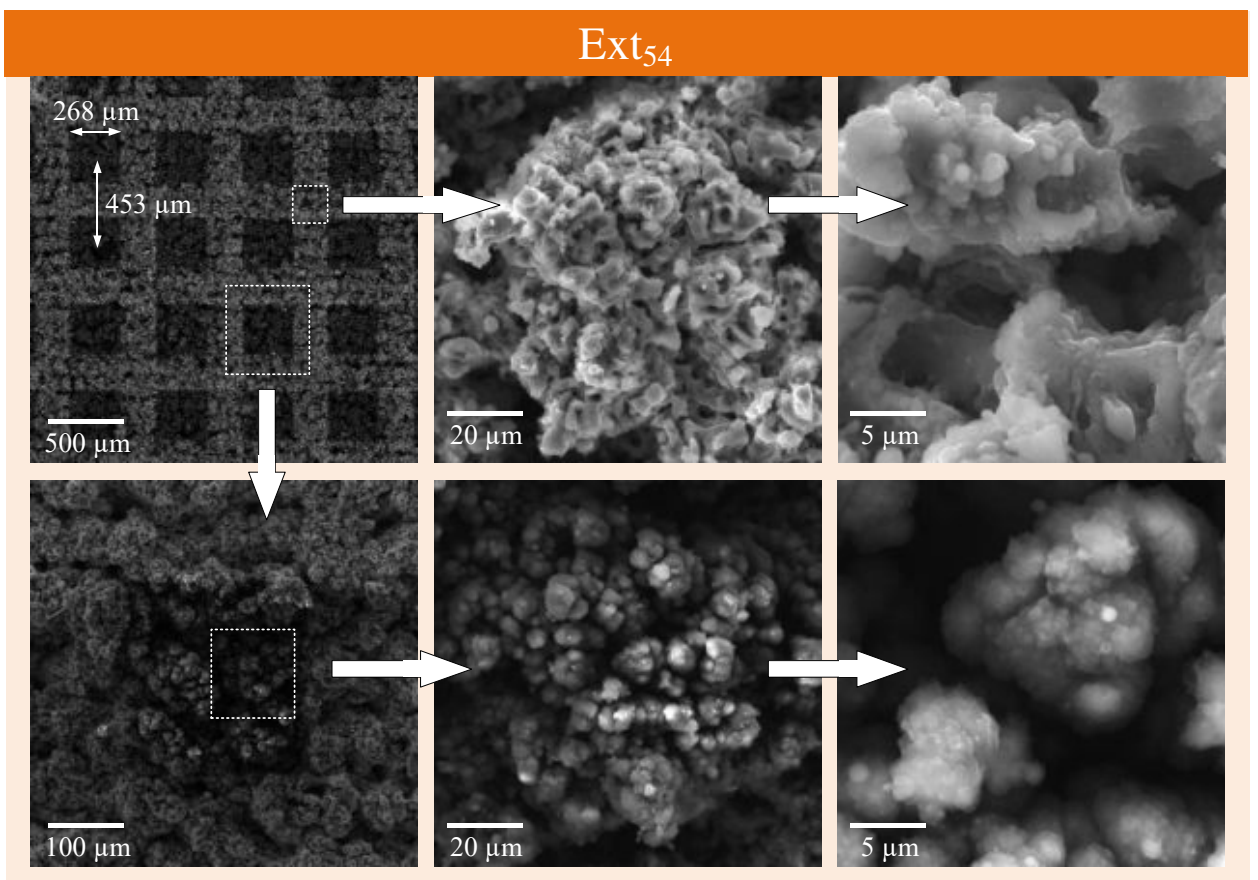
(a)



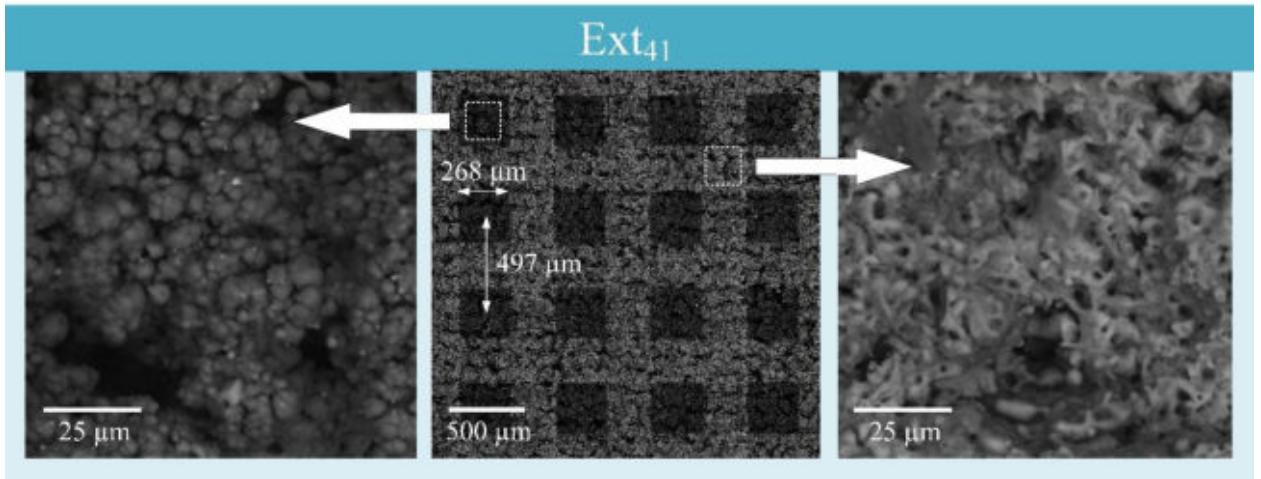
(b)



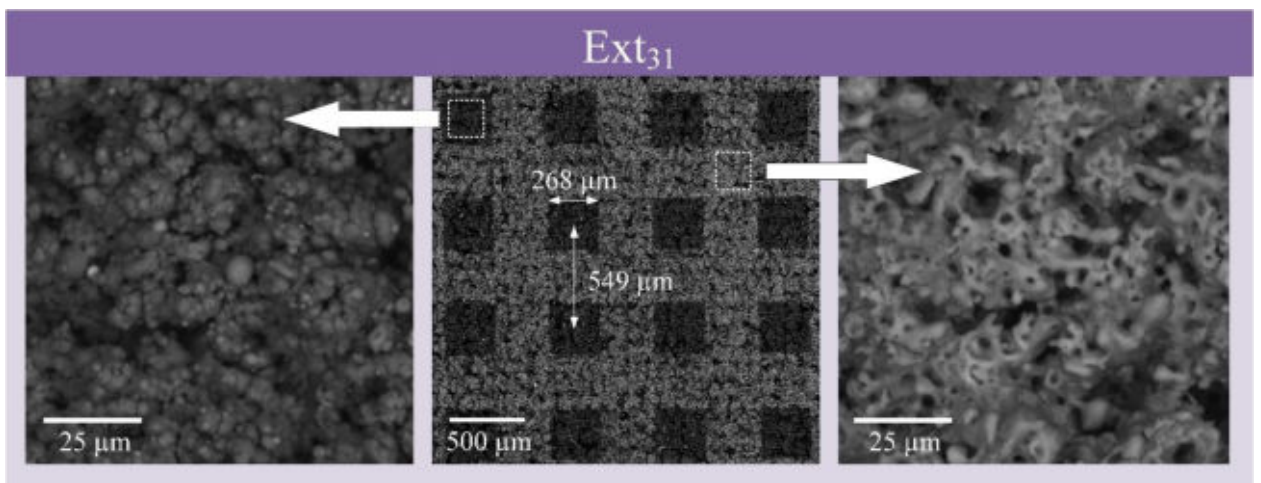
(e)



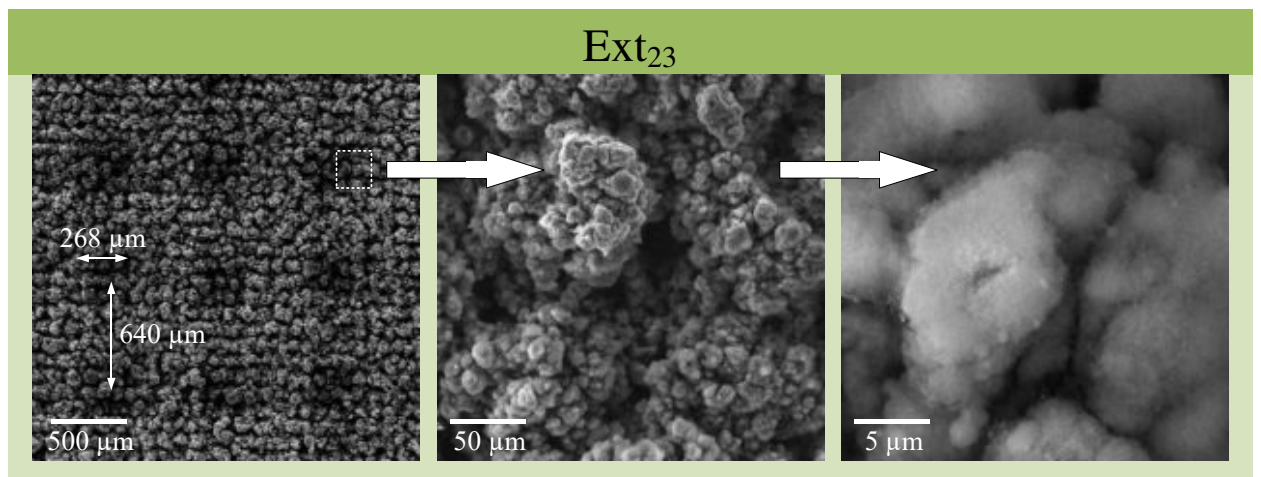
(e)



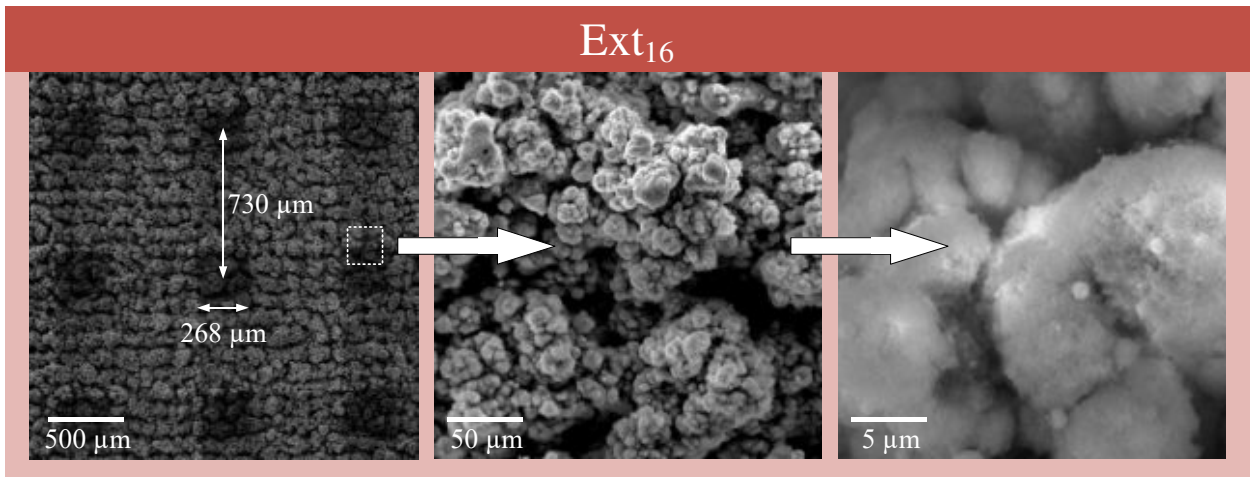
(d)



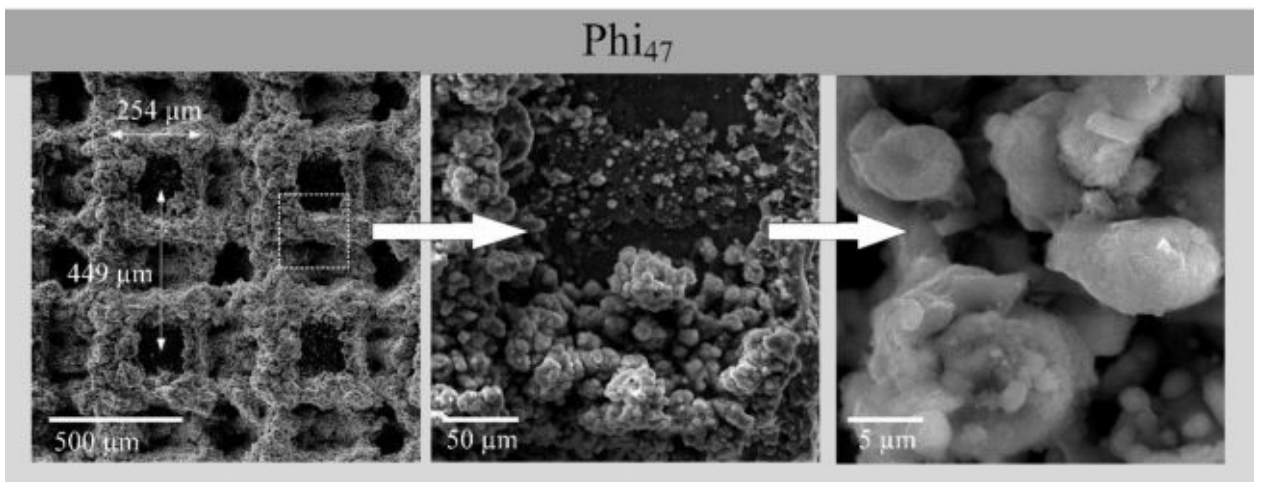
(e)



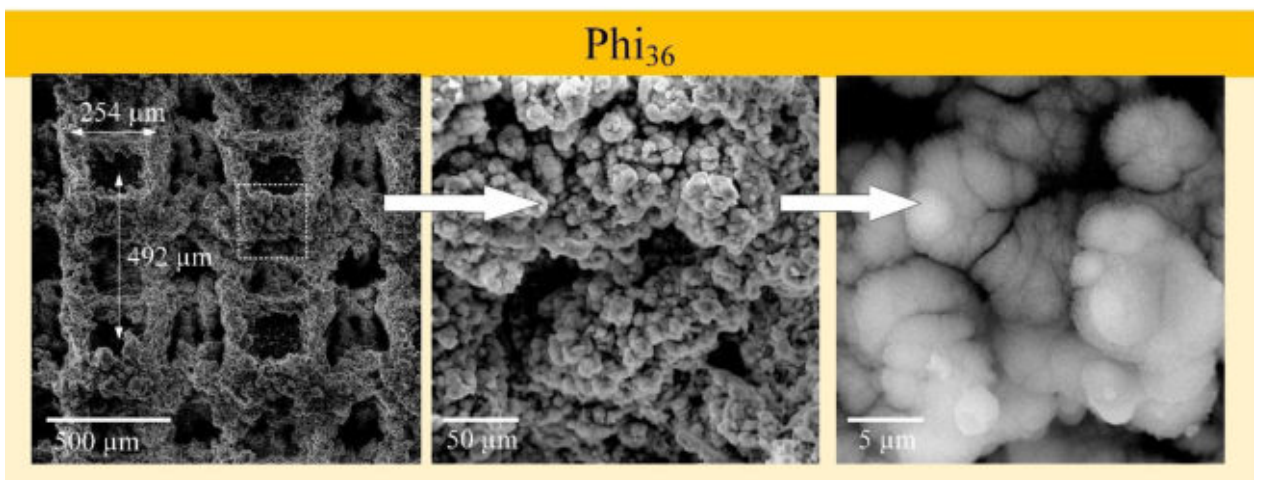
(ж)



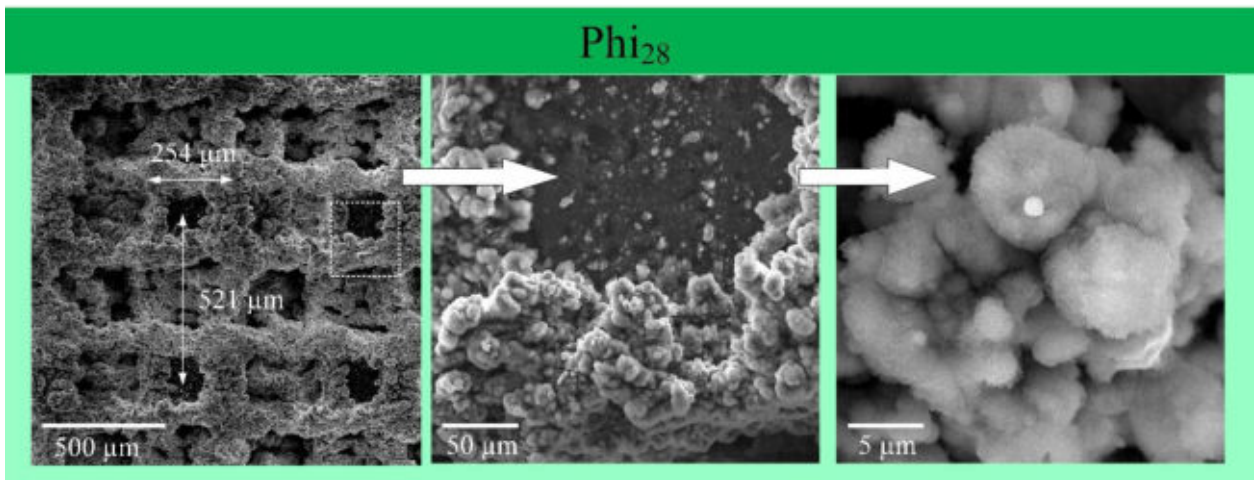
(3)



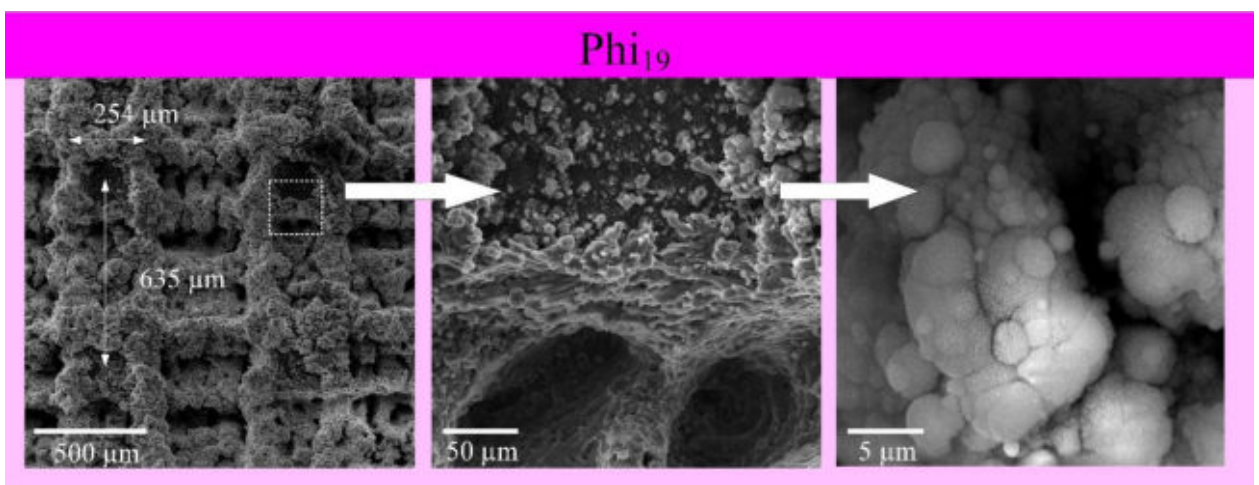
(u)



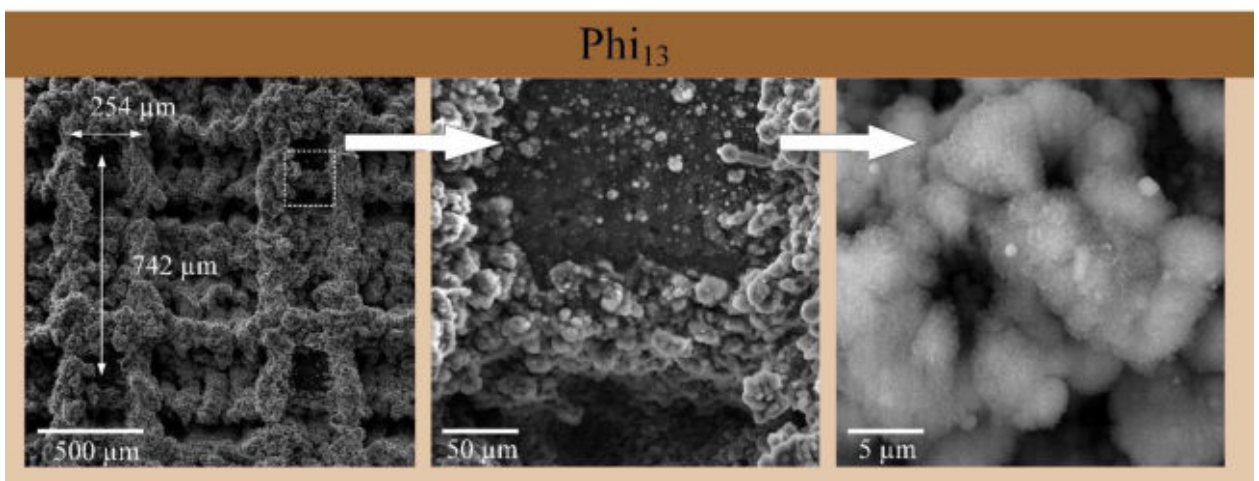
(κ)



(л)



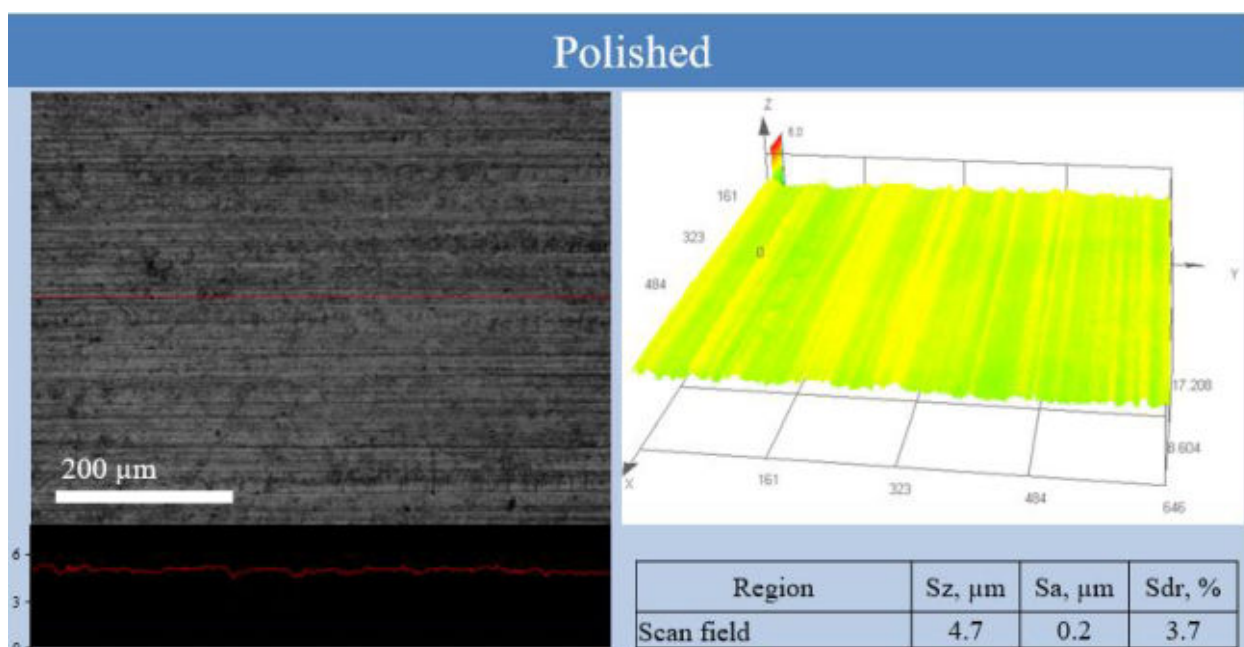
(м)



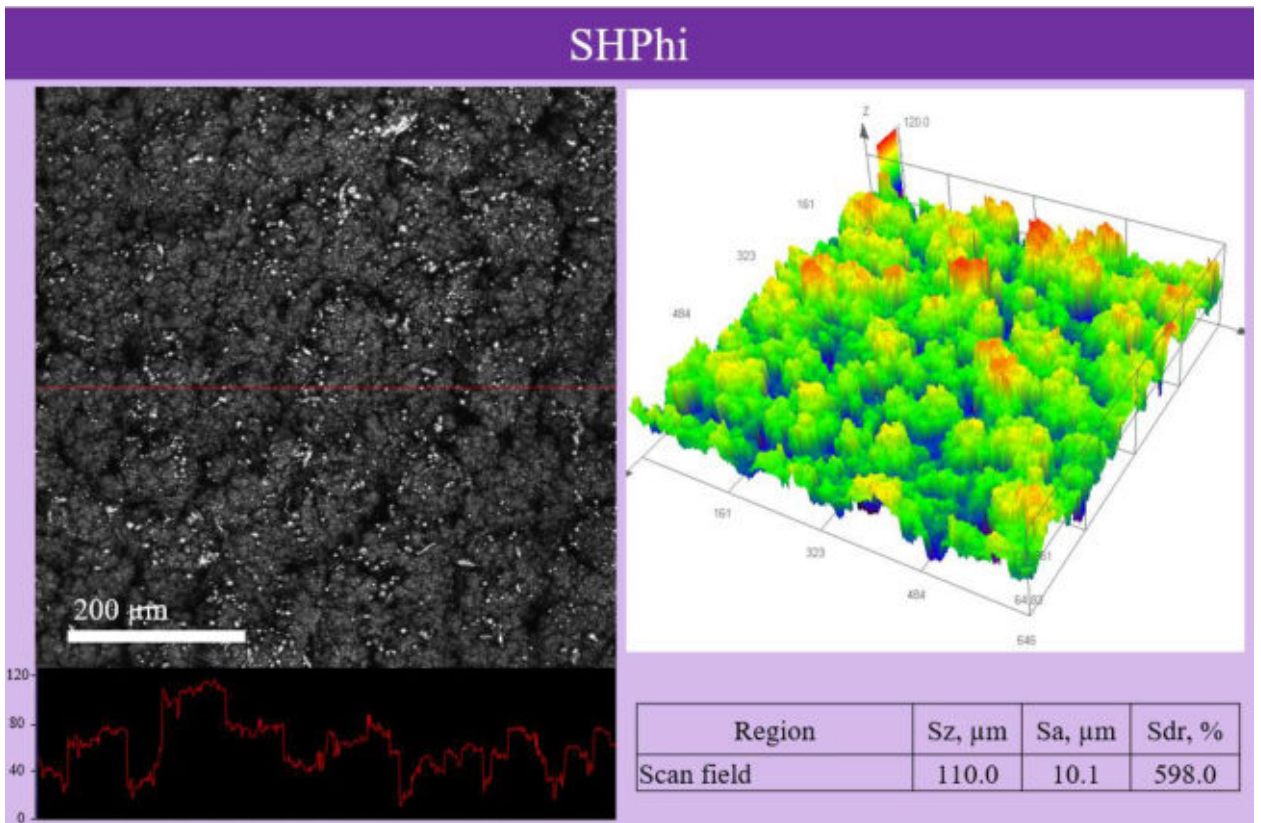
(н)

Рисунок 3.10 – Типичные СЭМ-изображения поверхностей:
a – полированная; *б* – SHPho; *в* – SHPhi; *г* – Ext₅₄; *д* – Ext₄₁; *е* – Ext₃₁;
ж – Ext₂₃; *з* – Ext₁₆; *и* – Phi₄₇; *к* – Phi₃₆; *л* – Phi₂₈; *м* – Phi₁₉; *н* – Phi₁₃

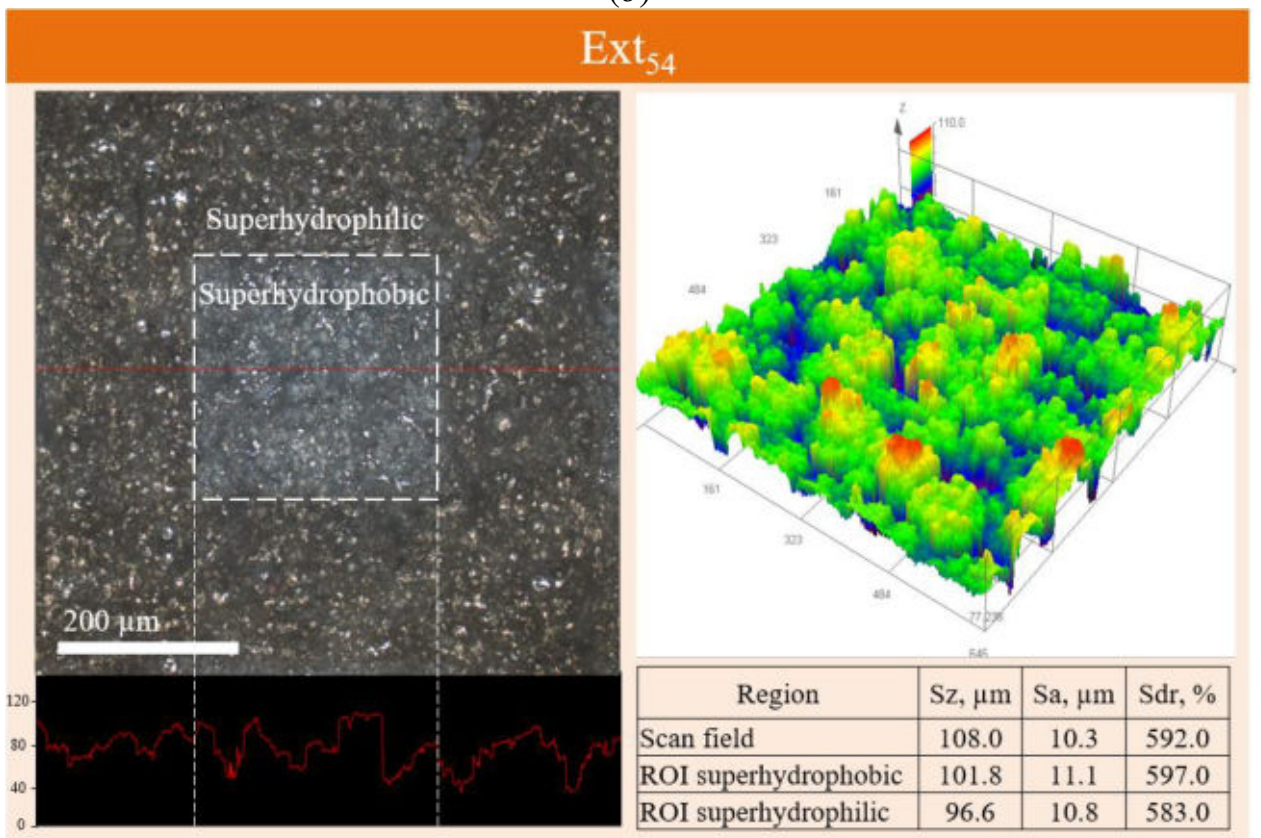
На СЭМ-изображениях (рисунок 3.10) видно, что текстуры поверхностей SHPhi (супергидрофильных), SHPho (супергидрофобных), а также образцов Ext₁₆, Ext₂₃, Ext₃₁, Ext₄₁, Ext₅₄ (с комбинацией супергидрофильных и супергидрофобных свойств) имеют схожую морфологию и характеризуются развитой многомодальной шероховатостью. Последнее обусловлено единым методом формирования текстур – лазерной абляцией, проводившейся с идентичными параметрами (мощность, частота импульсов, скорость сканирования). Важно отметить, что процедуры гидрофобизации (для поверхности SHPho) и создания супергидрофильных зон (для образцов Ext-серии) не вносят изменений в топографию поверхности на микро- и нано-уровне, что подтверждается сравнением СЭМ-изображений до и после модификации (рисунок 3.10). Последнее также подтверждается трехмерными топографическими картами поверхности, профилограммами и 3D-параметрами шероховатости, полученными методом профилометрии (рисунок 3.11).



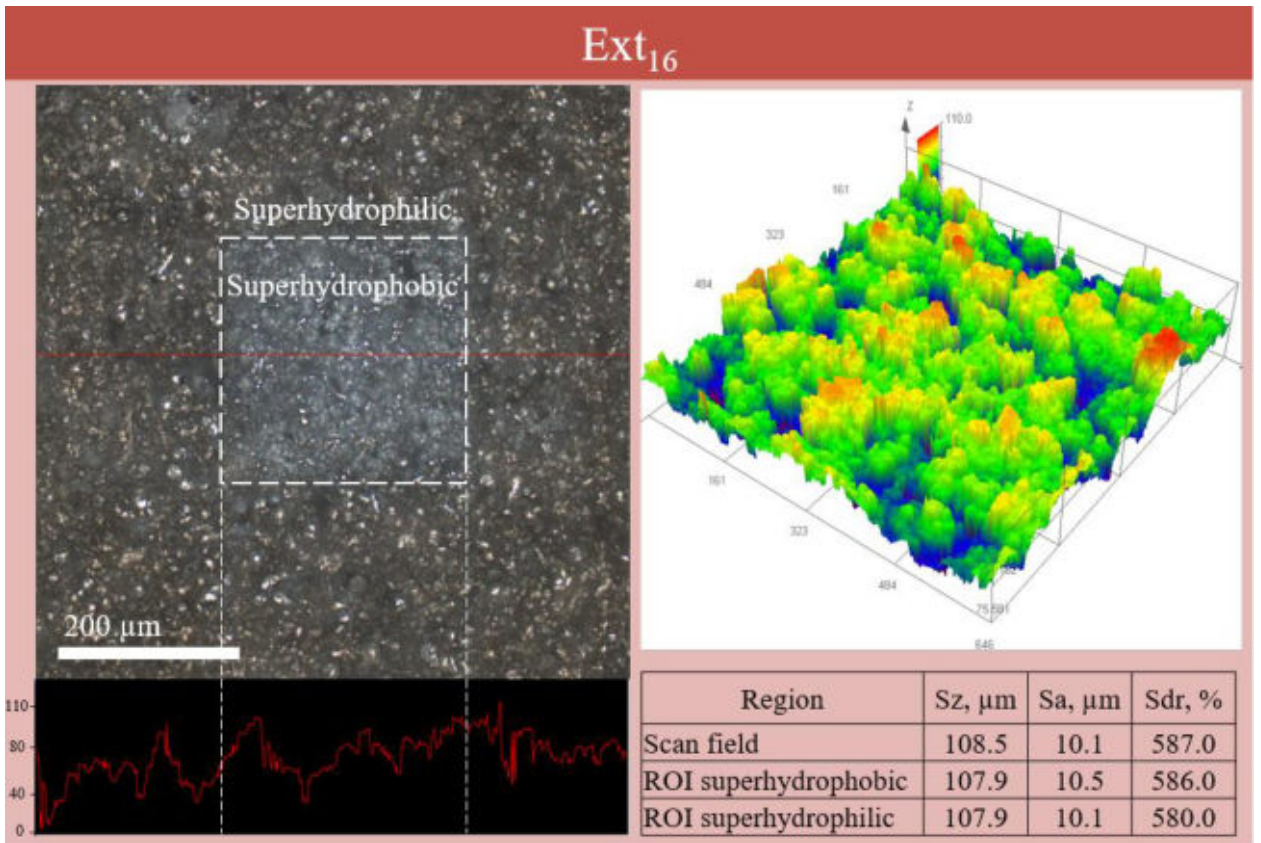
(a)



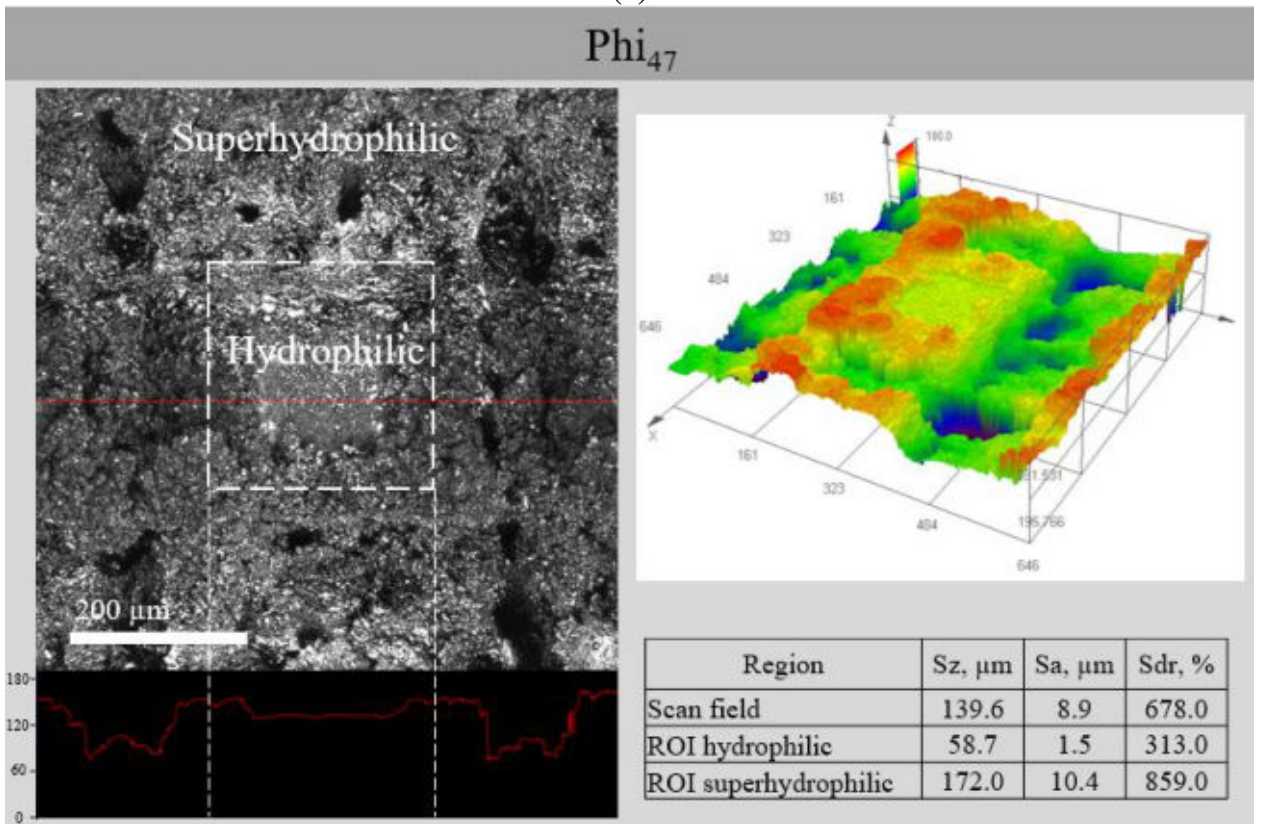
(d)



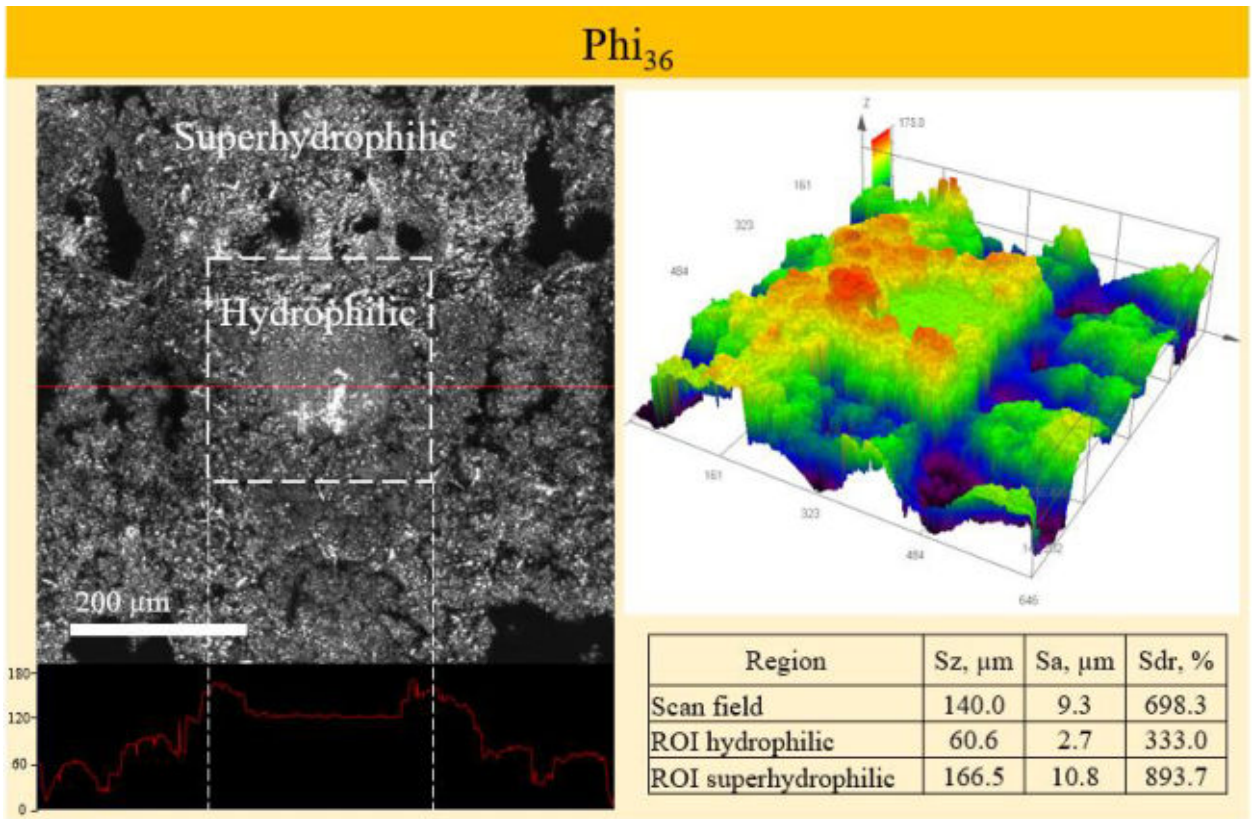
(e)



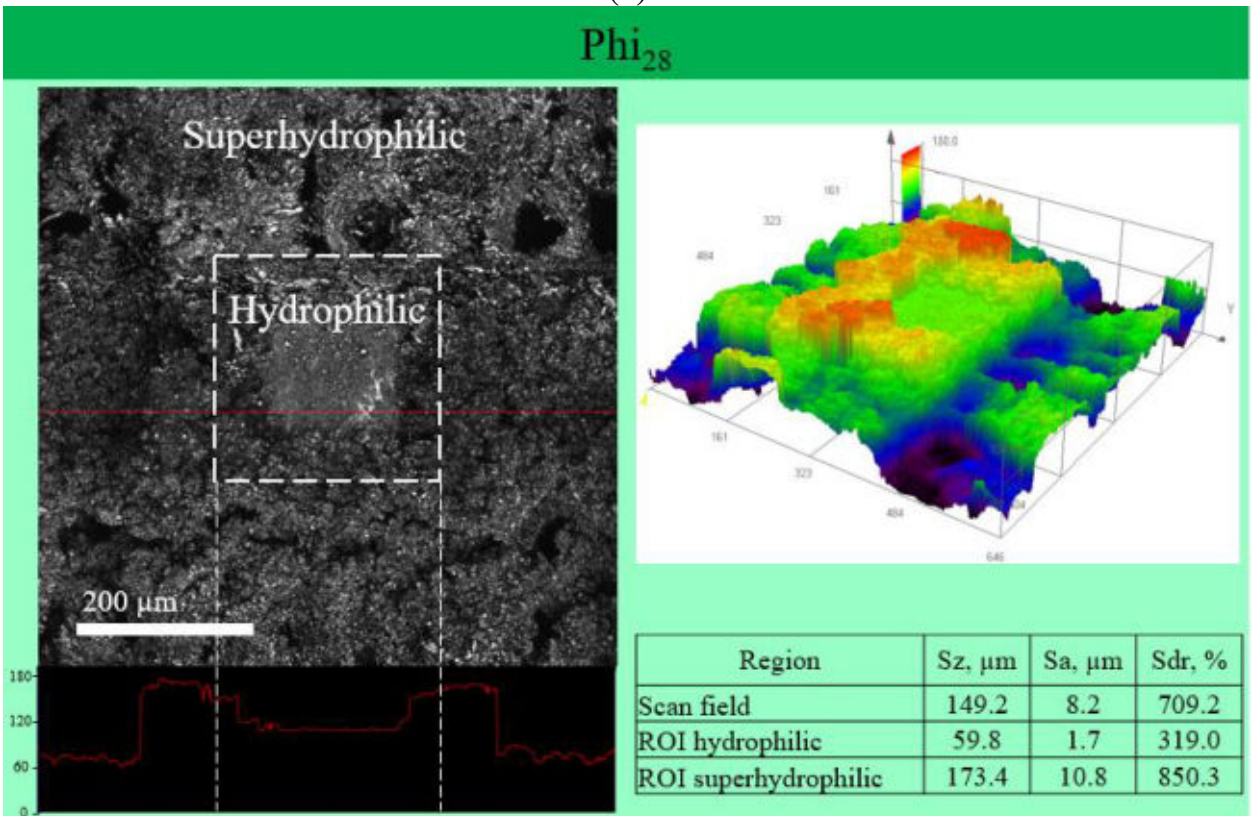
(e)



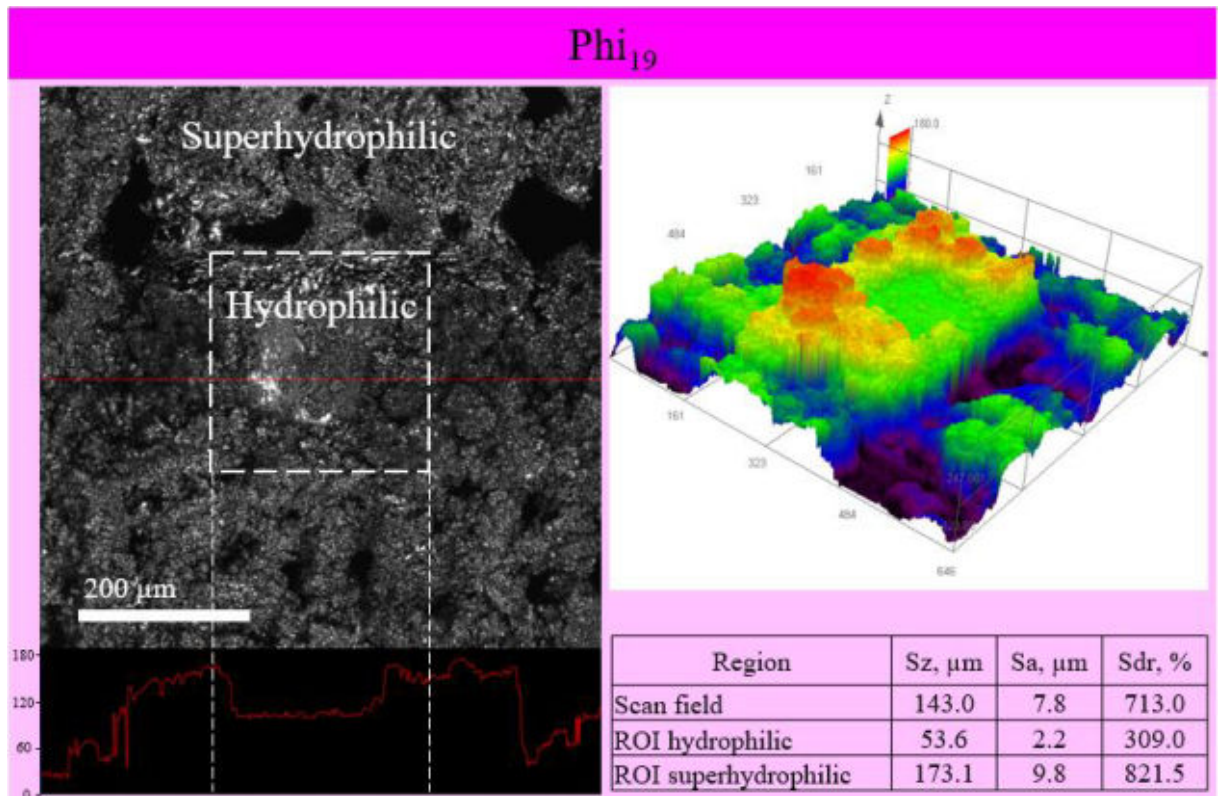
(d)



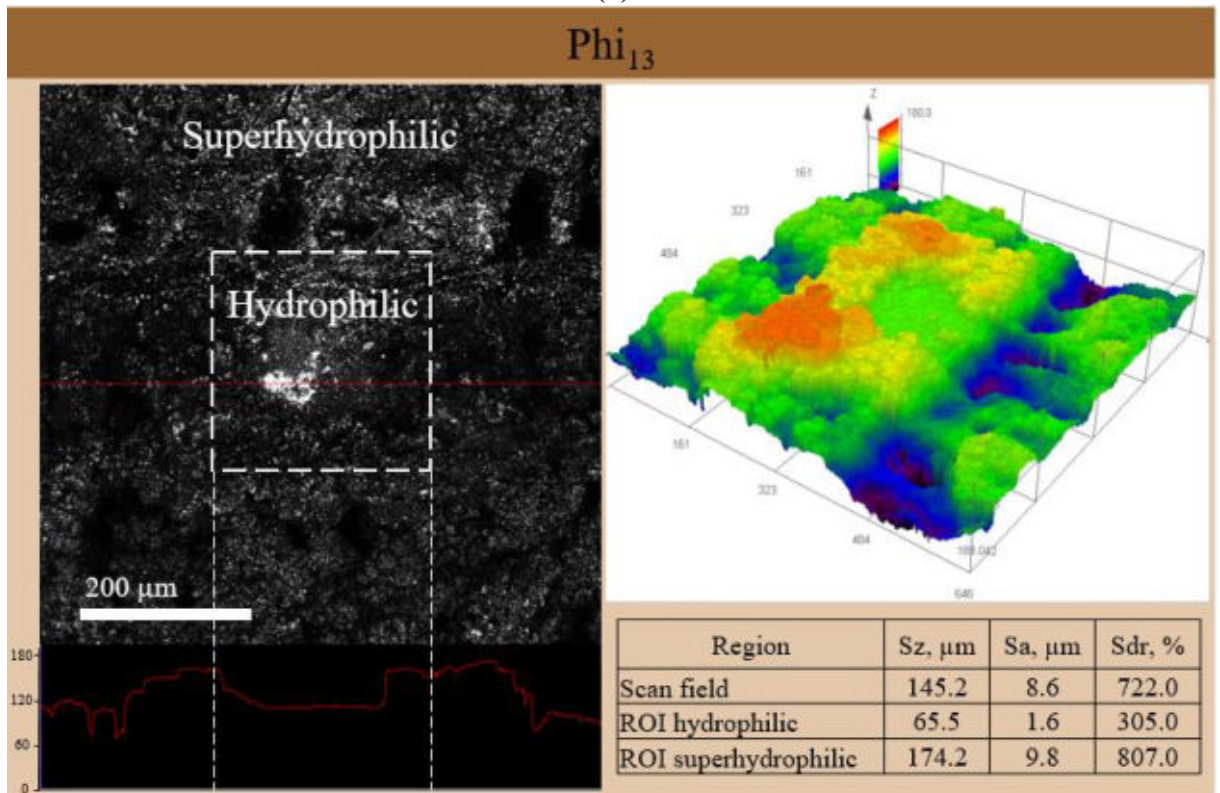
(e)



(ж)



(3)



(u)

Рисунок 3.11 – Изображение микротекстур, трехмерные топографические карты поверхности, профилограммы и 3D-параметры шероховатости (Sa, Sz, Sdr): *a* – полированная; *б* – SHPhi; *в* – Ext₅₄; *г* – Ext₁₆; *д* – Phi₄₇; *е* – Phi₃₆;

ж – Phi₂₈; *з* – Phi₁₉; *u* – Phi₁₃

*Изображения для поверхностей SHPho, Ext₂₃, Ext₃₁, Ext₄₁ не переведены, так как они подобны поверхностям SHPhi, Ext₁₆, Ext₅₄. В таблице приведены характеристики шероховатости с обозначением: «поле сканирования» («Scan Field») – вся площадь, которая была оцифрована микроскопом за один цикл сканирования для данного увеличения, параметры шероховатости (Sa, Sz, Sdr) для этой области являются интегральными; «область интереса» («Region of Interest, ROI») – участки выбраны как типичные с определёнными свойствами и текстурой, параметры шероховатости (Sa, Sz, Sdr) являются интегральными для данной локальной области

На рисунке 3.12 приведены параметры шероховатости Sa, Sz, Sdr поверхностей SHPhi, SHPho и Ext-серии с доверительными интервалами. Стандартное отклонение (RSD) для параметров Sz, Sa и Sdr по значениям, полученным в области «Scan Field» составляет менее 5 %. Различия между средними значениями Sdr, Sz, Sa для поверхностей SHPho, SHPhi, Ext-серии статистически не значимы, находятся в области доверительного интервала при сравнении значений, полученных в «Scan Field». Трёхмерные параметры шероховатости, являются статистическими данными, рассчитываются на основе выборки данных, поэтому обладают определённой чувствительностью к размеру анализируемой области, что объясняет наблюдаемые различия между значениями, полученными в масштабах Scan Field и ROI. Стоит отметить, что параметр шероховатости Sz демонстрирует наибольшую вариативность значений по сравнению с Sa и Sdr из-за чувствительности к присутствию крупных дефектов и неоднородностей текстуры. Значение Sz вычисляется как разница между максимальным выступом и минимальной впадиной относительно средней линии профиля по десяти измерениям, что способствует увеличению погрешности из-за редких, значительных вариаций текстуры поверхности, связанных с расположением продуктов абляции. При расчете Sa и Sdr используется среднеарифметическое значение всех данных, поэтому значительные

вариации рельефа текстуры не оказывают влияние на результат. Поэтому при анализе поверхностей с развитой шероховатостью может возникать разброс значений при определении именно параметра S_z в областях разных по размеру «Scan Field» и ROI.

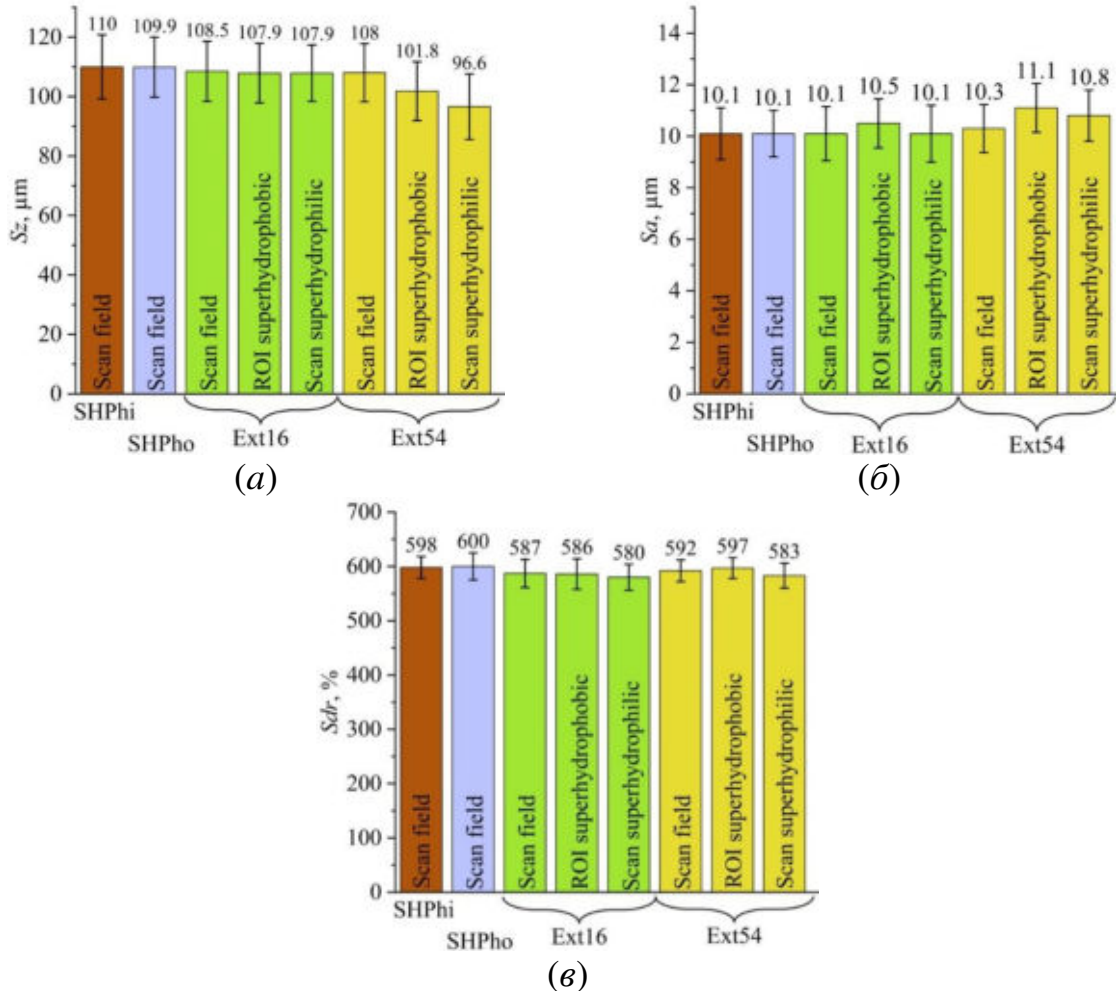


Рисунок 3.12 – Параметры шероховатости SHPhi, SHPho и Ext-серии поверхностей: *a* – S_z ; *б* – S_a ; *в* – S_{dr}

Для поверхностей SHPhi, SHPho и Ext-серии средние значения $S_a \approx 10,4$ мкм, $S_z \approx 105,8$ мкм свидетельствуют о формировании развитой, многомодальной шероховатости. Необходимо отметить, что прирост площади за счет шероховатости относительно полированной поверхности для данной серии поверхностей составил около 6 раз ($S_{dr} \approx 589\%$). Достигнута однородность текстуры при локальном изменении смачиваемости на поверхностях Ext-серии, SHPho и SHPhi. Этот результат

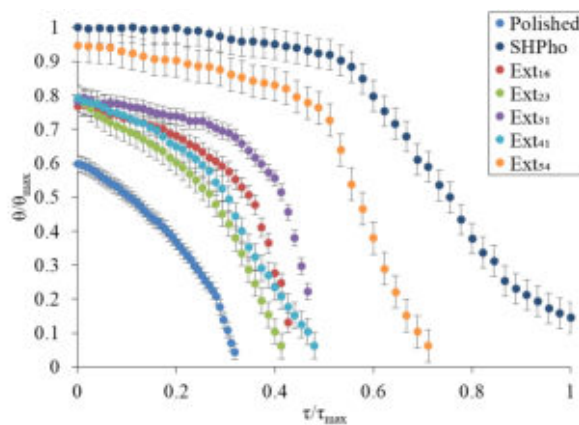
имеет особое значение в области изучения процессов теплообмена при испарении капель, взаимодействующих с поверхностями теплообмена, поскольку позволяет изучать влияние исключительно смачиваемости на характеристики теплообмена, то есть разделить смачиваемость и шероховатость как независимых параметров.

Поверхности Phi-серии характеризуются развитой многомодальной шероховатостью с более выраженными перепадами высот по сравнению с поверхностями Ext-серии, SHPho и SHPhi. Особенностью их топографии (шероховатости) является существенная разница в микрорельефе между гидрофильными зонами, не подвергавшимися прямому лазерному воздействию, и супергидрофильными участками, обработанными лазерным излучением. Анализ параметров шероховатости в области интереса (Region of Interest, ROI) (рисунок 3.11) показывает, что среднее арифметическое отклонение профиля S_a на гидрофильных участках составляет около 1,8 мкм, в то время как на супергидрофильных зонах этот параметр достигает 10,3 мкм, что почти в пять раз выше. Аналогичное существенное различие наблюдается и для других параметров, максимальная высота неровностей S_z отличается в три раза, а относительный прирост площади поверхности за счет шероховатости S_{dr} в 2,5–2,7 раза. Несмотря на наличие локальных зон с пониженной шероховатостью, интегральная характеристика S_{dr} для всей поверхности Phi-серии превосходит аналогичный показатель для поверхностей Ext-серии, SHPho и SHPhi на 10–20 %, что обусловлено в первую очередь значительными перепадами высот, характеризуемыми параметром S_z . Увеличенная площадь поверхности вследствие развитой шероховатости создает предпосылки для более интенсивного теплопереноса в условиях испарения капли, что позволяет ожидать превосходства поверхностей Phi-серии над другими исследуемыми поверхностями по эффективности отвода теплоты при испарении капли воды в идентичных экспериментальных условиях.

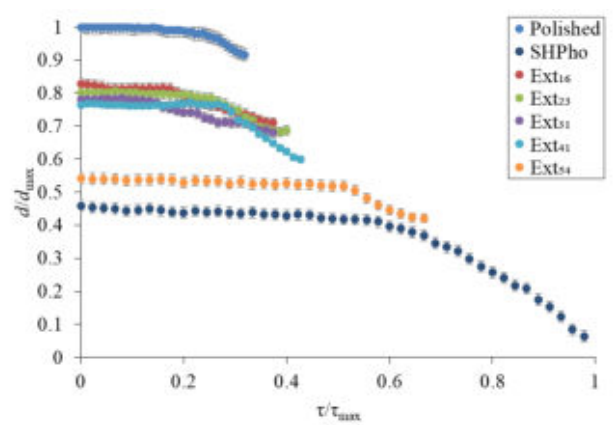
3.2.2 Режимы испарения на бифильных поверхностях: особенности по сравнению с полированными поверхностями и поверхностями с экстремальным смачиванием

На рисунке 3.13 представлены зависимости безразмерных параметров контактного угла, контактного диаметра, объема капли от безразмерного времени испарения при температуре нагрева поверхности $80\text{ }^{\circ}\text{C}$. Безразмерные параметры определены как отношение i -го (текущего) значения к наибольшему экспериментально зарегистрированному значению соответствующей величины. Для случая контактного угла θ_i/θ_{max} , где $\theta_{max} = 154,9\text{ }^{\circ}$ (зарегистрировано на поверхности SHPho); контактного диаметра d_i/d_{max} , где $d_{max} = 2,81\text{ мм}$ (зарегистрировано на поверхности Polished); объема V_i/V_{max} , где $V_{max} = 5\text{ мкл}$ (начальный объем капли); времени испарения τ_i/τ_{max} , где $\tau_{max} = 225\text{ с}$ (зарегистрировано на поверхности SHPho). Необходимо отметить снижение измеренного контактного угла на супергидрофобной поверхности (SHPho) с значения $168\pm 2\text{ }^{\circ}$ (при температуре поверхности алюминиевого сплава $20\text{--}22\text{ }^{\circ}\text{C}$, таблице 2.3) до $154,9\text{ }^{\circ}$ при нагреве поверхности до $80\text{ }^{\circ}\text{C}$. Данный эффект обусловлен взаимосвязанными физико-химическими факторами, хорошо изученными в [61,113–115] и связанными с изменениями физических свойств жидкости, термокапиллярных эффектов, термической деформации микро- и наноструктур. На супергидрофобной поверхности капля находится в состоянии метастабильного равновесия по механизму Кэсси-Бакстера (Cassie-Baxter), которое обеспечивается балансом между силами поверхностного натяжения жидкости и силами отталкивания от развитой многомодальной шероховатости, содержащей воздушные карманы. При нагреве поверхности данный баланс нарушается вследствие нескольких эффектов. Во-первых, происходит снижение поверхностного натяжения воды с $72,8\text{ мН/м}$ при $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ до $62,6\text{ мН/м}$ при $80\text{ }^{\circ}\text{C}$ [116]. Уменьшение поверхностного натяжения ослабляет способность капли сохранять

сферичность и противодействовать проникновению жидкости в многомодальную шероховатость, что приводит к увеличению смачиваемости и снижению контактного угла. Во-вторых, интенсификация испарения с поверхности капли при повышенной температуре приводит к формированию нестационарных термических и концентрационных градиентов. Испарение преимущественно интенсифицировано в области линии трехфазного контакта [50,117]. Последнее является причиной течений Марангони внутри капли [44]. Эти течения способствуют перераспределению массы жидкости и могут вызывать «растягивание» капли по поверхности (уменьшение контактного угла). В-третьих, термическое воздействие приводит к расширению как материала подложки (алюминиевого сплава), так и захваченного в микрополостях воздуха. Коэффициент теплового расширения алюминия составляет около $23 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$, что может вызывать незначительное изменение геометрии микро- и наноструктур. Нагрев воздуха в «карманах» приводит к его вытеснению из микро- и наноструктур, способствуя переходу от режима Кэсси-Бакстера к режиму Венцеля.



(a)



(б)

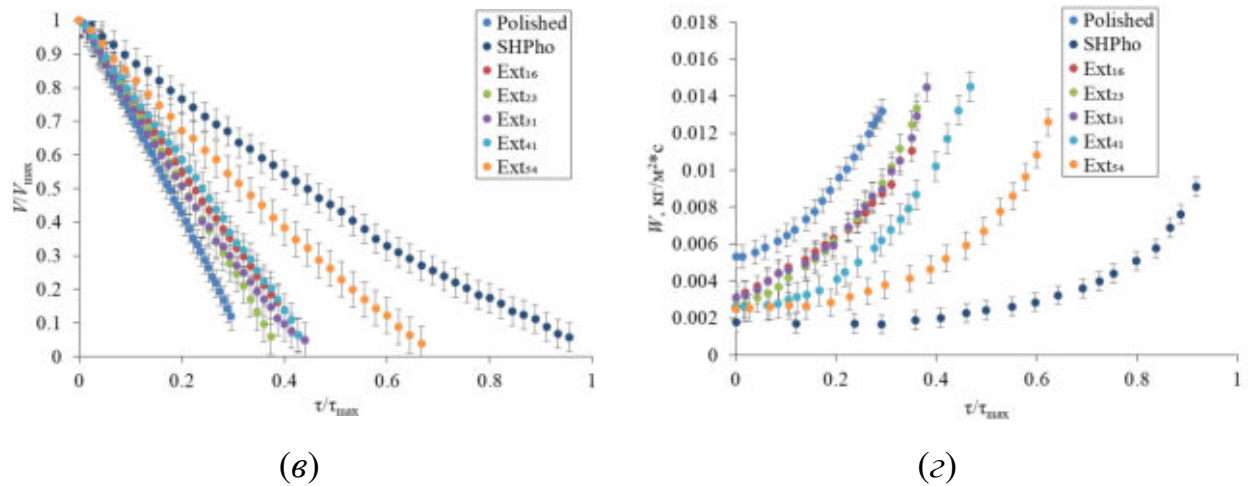


Рисунок 3.13 – Зависимости безразмерных геометрических размеров и удельной скорости испарения капли воды от безразмерного времени её испарения: *a* – контактного угла; *b* – контактного диаметра; *в* – объем капли; *г* – удельной скорости испарения

В [48,118] показано, что процесс испарения капли теплоносителя может осуществляться в трех последовательно сменяющих друг друга режимах: 1) «пиннинг» (CCD), характеризующийся постоянным контактным диаметром при уменьшающемся контактном угле; 2) режим постоянного контактного угла (CCA), при котором сохраняется постоянный контактный угол при уменьшающемся контактном диаметре; и 3) смешанный режим, в котором одновременно уменьшаются как контактный угол, так и контактный диаметр. Проведенный анализ экспериментальных зависимостей (рисунок 3.13*a*–3.13*в*) позволил идентифицировать указанные режимы испарения на исследованных поверхностях. Установлено, что капля воды на полированной поверхности Polished испаряется в режиме CCD на протяжении около 80 % от общего времени испарения, после чего этот режим сменяется смешанным, характеризующимся одновременным уменьшением контактного угла и контактного диаметра. На супергидрофобной поверхности SHPho зарегистрирован принципиально иной характер испарения. Начальная стадия процесса (примерно 30 % от

общего времени) протекает в режиме ССА, который затем также переходит в смешанный режим.

Выявленные режимы испарения на поверхностях Polished и SHPho, их последовательность и временные параметры демонстрируют хорошую согласованность с известными литературными данными, например, [48,118], что подтверждает их типичность для полированных гидрофильных и супергидрофобных поверхностей металлов и их сплавов. Эта согласованность свидетельствует об адекватности методики и достоверности результатов проведенных экспериментальных исследований процесса испарения капель воды, что является основой для дальнейшего анализа более сложных случаев, в частности, испарения на структурированных поверхностях с пространственно-модифицированными свойствами смачиваемости.

Режимы испарения капель на поверхностях с комбинацией экстремальных свойств смачивания (супергидрофильных и супергидрофобных), демонстрируют сходство с режимами, зарегистрированными в экспериментах с полированной поверхностью Polished. Для поверхностей Ext₁₆, Ext₂₃, Ext₃₁ и Ext₄₁ режим постоянного контактного диаметра составляет 40–50 % от общего времени испарения, в то время как для поверхности Ext₅₄ этот показатель достигает 80 %, после чего во всех случаях следует смешанный режим. Важно отметить, что механизм движения линии трехфазного контакта в процессе испарения на бифильных поверхностях с однородной шероховатостью аналогичен таковому на гидрофильной поверхности Polished, что указывает на универсальность физических механизмов, несмотря на сложность поверхностной функционализации.

На основании анализа режимов испарения на полированных гидрофильных и структурированных поверхностях сформулированы следующие выводы:

1. При температуре поверхности $80\text{ }^{\circ}\text{C}$ на структурированных поверхностях с комбинацией супергидрофобных и супергидрофильных свойств и однородной шероховатостью режимы испарения и их последовательность подобны наблюдаемым на полированных гидрофильных поверхностях металлов и сплавов. Это позволяет предположить, что особые режимы испарения на бифильных поверхностях, описанные, например, в [13,46,49,66], скорее всего, связаны не с контрастом смачиваемости как таковым, а с различиями в текстуре и шероховатости между зонами с разной смачиваемостью, которые использовались в других исследованиях.

2. Комбинация супергидрофобных и супергидрофильных свойств на бифильных поверхностях оказывает значительное влияние на временные параметры режимов испарения по сравнению с полированными поверхностями. Установлено, что при соотношении площадей супергидрофобных и супергидрофильных зон менее 50 % (поверхности Ext₁₆, Ext₂₃, Ext₃₁, Ext₄₁) длительность режима пиннинга (CCD) сокращается на 30–40 %, в то время как общее время испарения увеличивается на 30–35 %. Напротив, при соотношении более 50 % (поверхность Ext₅₄) длительность пиннинга соответствует полированной поверхности, но общее время испарения возрастает более чем в два раза.

Эти результаты свидетельствуют о том, что поверхности с контролируемым соотношением зон различной смачиваемости представляют практический интерес для управления процессом испарения. Способность таких поверхностей локализовывать теплоноситель в теплонагруженных областях, увеличивая тем самым время испарения, открывает перспективы создания высокоэффективных систем охлаждения в энергетике и электронике.

Следует отметить, что на рисунке 3.13 не приведены данные по испарению капель на супергидрофильных поверхностях SHPhi и на поверхностях с супергидрофильными/гидрофильными свойствами смачивания Phi₁₃, Phi₁₉, Phi₂₈, Phi₃₆, Phi₄₇. Это связано с тем, что на таких

поверхностях капля воды мгновенно растекается, формируя тонкую пленку теплоносителя, что делает невозможным регистрацию изменения контактного угла $\theta_i = f(\tau)$, диаметра $d = f(\tau)$, объема $V = f(\tau)$ и скорости испарения $W = f(\tau)$ с использованием применяемой системы регистрации быстропротекающих процессов. Для исследования процессов на этих поверхностях применена альтернативная методика с использованием малоинерционных высокоточных микротермопар. Эта методика позволила установить «эффект охлаждения» нагретой поверхности SHPhi и всей Phi-серии при дозированном нанесении капли дистиллированной воды, что обеспечило получение характеристик теплообмена для всех исследуемых типов поверхностей.

Авторами [42,93] показано, что при идентичных внешних условиях капля теплоносителя интенсивнее испаряется на поверхностях, характеризующихся лучшим смачиванием, то есть процесс испарения происходит значительно быстрее на гидрофильных поверхностях по сравнению с гидрофобными. Последнее обусловлено тем, что передача теплоты от поверхности к капле осуществляется преимущественно за счёт теплопроводности. На гидрофильных поверхностях площадь поверхности теплообмена между каплей и поверхностью нагрева характеризуемая контактным диаметром, существенно превышает аналогичный параметр на гидрофобных поверхностях. В результате количество теплоты, передающейся от нагретой поверхности к капле, оказывается значительно выше в случае гидрофильной поверхности, что, в свою очередь, интенсифицирует процесс фазового перехода и приводит к ускоренному испарению. Полученные экспериментальные данные демонстрируют эту закономерность. Как и ожидалось, в ходе исследований наибольшее время испарения капли воды объёмом 5 мкл зарегистрировано на супергидрофобной поверхности SHPho и составило 225 с при температуре нагрева поверхности 80 °С. Этот результат подтверждает тезис о том, что смачиваемость супергидрофобной поверхности значительно ограничивает

площадь теплового контакта и, как следствие, уменьшает интенсивность теплопередачи и скорость испарения по сравнению со всеми другими исследованными типами поверхностей, демонстрируя влияние смачиваемости поверхности на процесс испарения капли воды.

Из анализа данных, представленных на рисунке 3.13₂, следует, что скорость испарения капли воды на поверхностях с комбинацией супергидрофобных и супергидрофильных зон (Ext-серия поверхностей), оказывается существенно ниже, чем на полированной поверхности Polished. Из зависимостей на рисунке 3.13₂ также видно, что увеличение степени гидрофобизации бифильных поверхностей, то есть рост доли площади с супергидрофобными свойствами относительно супергидрофильной зоны, приводит к снижению скорости испарения капли при температуре нагрева 80 °С. При степени гидрофобизации 54 % (поверхность Ext₅₄), когда соотношение площадей с супергидрофобными и супергидрофильными свойствами составляет 54:46, характеристики испарения капли воды схожи с характеристиками, зарегистрированными для полностью супергидрофобной поверхности SHPho. В диапазоне степеней гидрофобизации от 16 % до 41 % (поверхности Ext₁₆, Ext₂₃, Ext₃₁, Ext₄₁) кинетика испарения капли воды также демонстрирует близкие значения и остается значительно ниже, чем на полированной поверхности. По результатам анализа скоростей испарения поверхностей Ext-серии установлено, что при уменьшении доли гидрофобной зоны в 3,3 раза (с 53,8 % до 16,1 %), скорость испарения возрастает в 2,8 раза. Последнее подтверждает зависимость скорости испарения от соотношения площадей гидрофильных/гидрофобных зон.

На основании проведенного анализа скорости испарения капли воды можно было бы сделать достаточно тривиальный вывод о том, что комбинация супергидрофильных и супергидрофобных свойств поверхностей с развитой шероховатостью, нагретых до температуры, близкой к температуре насыщения теплоносителя (при атмосферном давлении), не приводит к росту скорости испарения и, следовательно, должна

характеризоваться менее эффективным охлаждением поверхности по сравнению с полированными поверхностями теплообмена. Такой вывод предполагал бы, что использование поверхностей с экстремальными противоположными свойствами смачивания для целей интенсификации теплообмена при температурах нагрева до точки насыщения охлаждающего теплоносителя является неперспективным. Однако данный вывод, основанный исключительно на анализе скорости испарения, оказался бы ошибочным. Это убедительно доказывают результаты экспериментальных исследований, выполненных методами PIV (раздел 3.2.3) и PLIF (раздел 3.2.4). Наиболее наглядно выделенные эффекты обосновывают данные, полученные при контроле степени изменения температуры в приповерхностном слое толщиной 500 мкм благодаря испарению капли воды («эффекта охлаждения») (раздел 3.2.5). Эти измерения доказывают, что несмотря на снижение скорости испарения, бифильные структурированные поверхности обеспечивают более интенсивное охлаждение вблизи границы раздела фаз по сравнению с полированной поверхностью. Неочевидный результат обусловлен тем, что традиционный подход, связывающий эффективность охлаждения исключительно со скоростью испарения, является приближенным. Он не учитывает особенностей процесса теплообмена на бифильных структурированных поверхностях, формирование специфичных паттернов течения внутри капли, интенсификацию конвективного переноса массы и теплоты вблизи трехфазной линии, а также изменение механизма теплопередачи благодаря синергетическому эффекту от взаимодействия гидрофильных и гидрофобных зон. Хотя скорость испарения капли на бифильных поверхностях ниже, чем на полированной, локальная эффективность теплоотвода в области контакта капли с нагретой поверхностью оказывается выше. Это приводит к более значительному снижению температуры поверхности в зоне непосредственного контакта, что и было зафиксировано методом PLIF и в экспериментах с «эффектом охлаждения». Следовательно, оценка

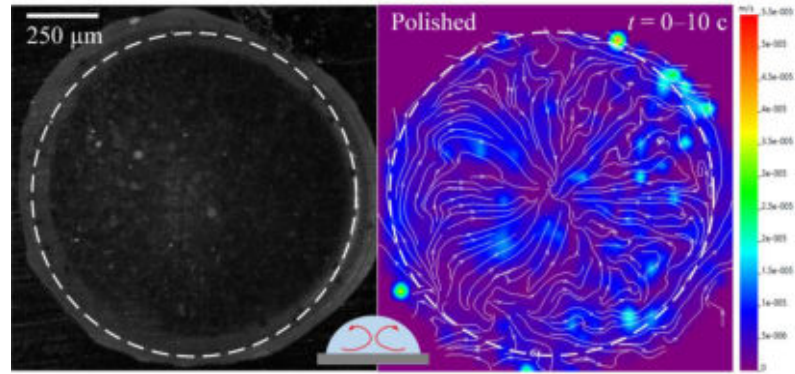
эффективности теплообмена только по интегральным параметрам, таким как общая скорость испарения, без учета пространственного распределения температур и полей скорости в капле, является недостаточной и может привести к некорректным выводам. Бифильные поверхности можно считать перспективными для интенсификации теплообмена именно за счет создания локализованных зон с экстремально высокой интенсивностью охлаждения, что в полной мере не отражается в интегральной скорости испарения.

3.2.3 Внутренние конвективные течения в капле, усиление термокапиллярной конвекции

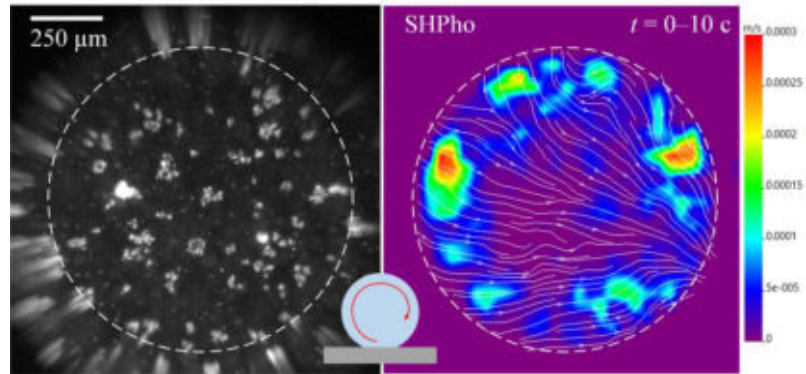
Полученные методом PIV поля скоростей позволили идентифицировать структуру и динамику возникающих конвективных вихрей внутри капли. Представленные векторные поля (рисунок 3.14) получены в характерном сечении, расположенном в непосредственной близости от границы раздела фаз «жидкость/твёрдая поверхность» при температуре нагрева 80 °С, что соответствует условиям интенсивного испарения. В результате проведенных исследований установлена динамика изменения вектора скорости как среднеарифметических, так и максимальных значений.

На рисунке 3.14 представлены типичные регулярные поля скоростей конвекции в капле воды и реконструированные траектории движения конвективных потоков, полученные путём определения среднеарифметических значений полей скоростей, зарегистрированных в течение первых 10 секунд нагрева капли. Этот начальный интервал соответствует периоду формирования наибольших температурных градиентов и установления конвективной структуры. Анализ чувствительности показал, что картина течений устойчива к изменению длительности усреднения в пределах 5–30 секунд, а отклонения средних скоростей не превышают 6 %. Временной интервал для усреднения

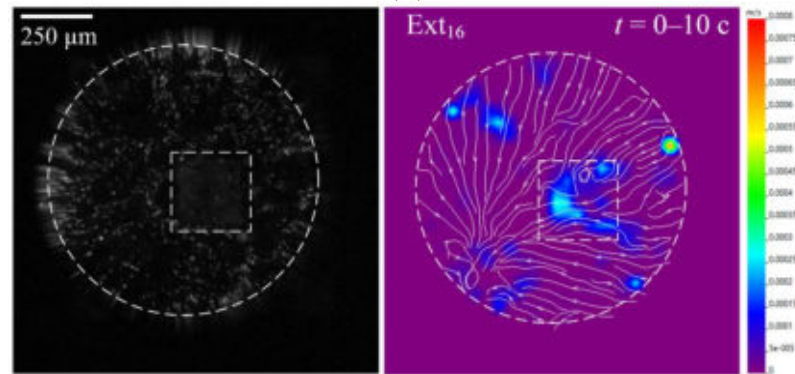
скоростей конвективного потока и анализа картин конвективного потока был выбран на основе исследований [42]. В [42] обнаружено, что для полированных, гидрофильных, гидрофобных и бифильных поверхностей 10-ти секундный временной интервал (с момента нанесения капли воды на поверхность) охватывает начальную стадию испарения и установление стабильной картины конвекции. Дополнительно на рисунке 3.14 приведены кадры видеogramм, полученные в начальный момент времени ($t = 0$), с выделенными границами области определения характеристик конвекции (окружности, обозначенные пунктирными линиями) и зонами с супергидрофобными свойствами (квадраты, выделенные пунктирными линиями). На видеокадрах присутствуют участки с аномально высокой светимостью, соответствующие областям поверхности, где трассеры осели на вершинах микрошероховатостей. При проведении обработки полученных видеogramм подобные артефакты исключены из анализа путём применения специальных алгоритмов маскирования, что обеспечило достоверность определения скоростей конвективных потоков и исключило влияние случайных погрешностей, связанных с неравномерным распределением трассирующих частиц.



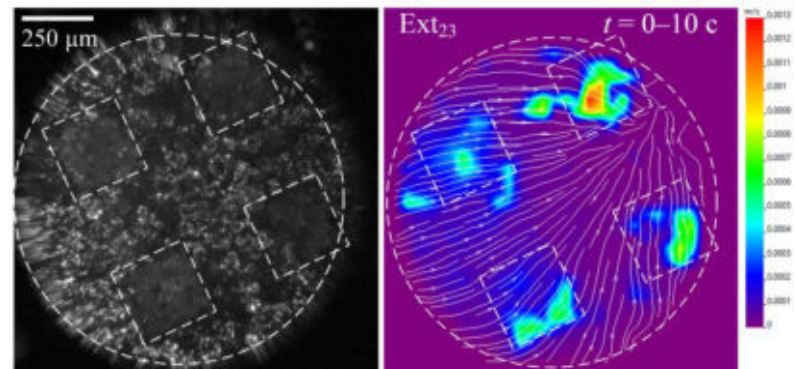
(a)



(b)



(c)



(d)

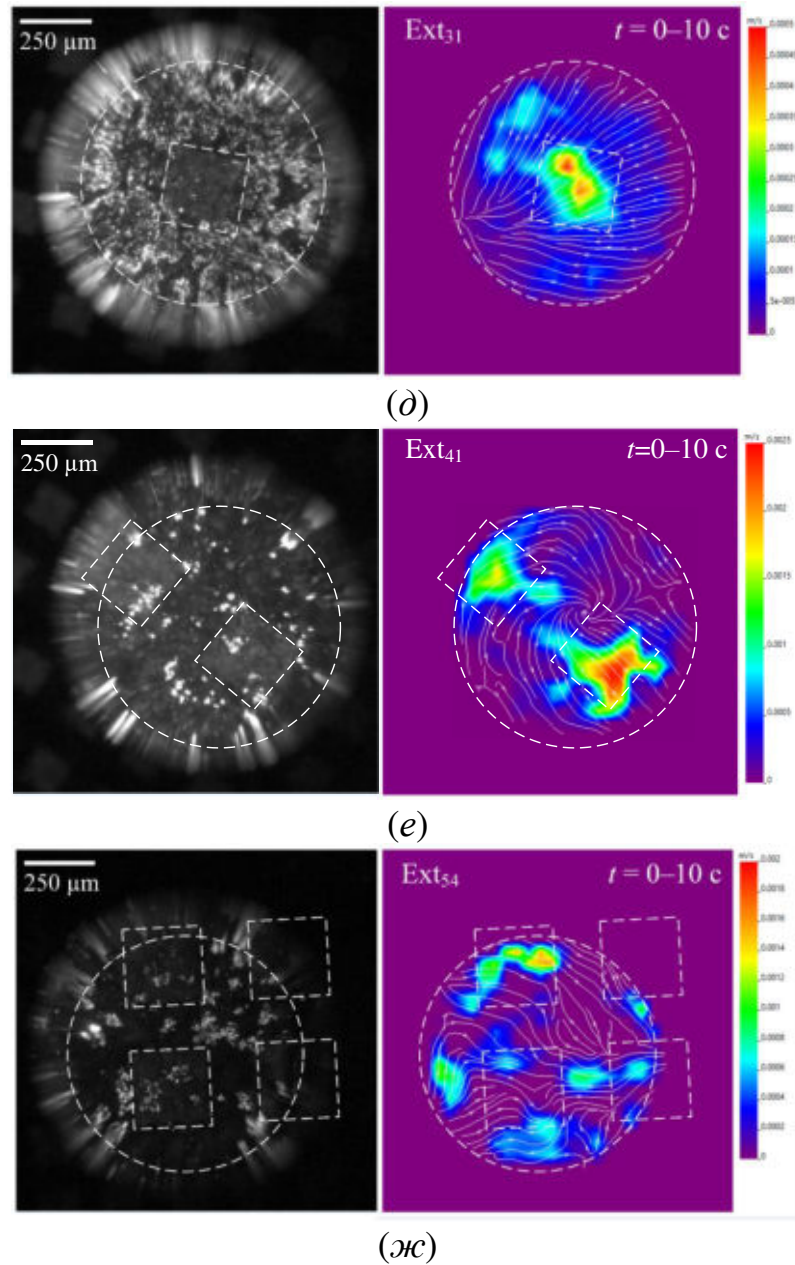


Рисунок 3.14 – Поля скоростей конвекции жидкости в испаряющихся каплях, полученные методом PIV на поверхностях: *a* – Polished; *б* – SHPho; *в* – Ext₁₆; *г* – Ext₂₃; *д* – Ext₃₁; *е* – Ext₄₁; *ж* – Ext₅₄

На полированной поверхности Polished (рисунок 3.13*a*) зарегистрирована характерная картина конвективных потоков, направленных от периферии капли к её центру. Возникновение такой структуры течений, особенно выраженное в верхних слоях капли, где формируется внутреннее вихревое движение, имеет хорошо установленное в научной литературе объяснение [46,119–122] и обусловлено двумя физическими механизмами.

Во-первых, проявляется релеевская (термогравитационная) конвекция, при которой жидкость в центральной части капли движется вверх, а вблизи границы раздела фаз жидкость/газ происходит нисходящее движение, формируя замкнутую циркуляционную петлю внутри капли. Данное явление обусловлено возникновением характерного температурного поля. На вершине капли формируется область пониженной температуры, тогда как вблизи линии трехфазного контакта наблюдается повышенная температура. Нагретая вода с пониженной плотностью поднимается вверх в центральной части капли, в то время как охлажденная жидкость опускается вниз в периферийных областях, создавая таким образом внутренний поток, направленный сверху вниз. Во-вторых, существенный вклад в формирование конвективной картины вносит поток Марангони, вызванный наличием градиента поверхностного натяжения вследствие неравномерного распределения температуры по поверхности капли. Поскольку температура жидкости существенно выше в области линии трехфазного контакта по сравнению с вершинной областью капли, возникает перепад поверхностного натяжения. Более нагретая вода с меньшим поверхностным натяжением переносится менее нагретой жидкостью сначала к вершине капли, а затем вниз к её центру, создавая дополнительную циркуляцию.

Оба этих механизма, действуя синергетически, формируют сложную трехмерную структуру течений в испаряющейся капле, причем их относительный вклад зависит от геометрии капли, физических свойств жидкости и характеристик поверхности. На полированных гидрофильных поверхностях металлов и их сплавов, где обеспечивается хороший тепловой контакт и эффективный подвод теплоты, такая картина течений является наиболее выраженной и устойчивой, что полностью соответствует полученным экспериментальным данным. Зарегистрированная картина конвективных течений внутри капли, расположенной на полированной гидрофильной поверхности алюминиевого сплава, демонстрирует полное соответствие с экспериментальными и численными данными,

представленными в [51,54,77,123]. Важно отметить совпадение не только общей конфигурации вихрей, но и значений скоростей течения (средняя скорость в диапазоне 0,04–0,13 мм/с, максимальная скорость в диапазоне 0,38–4,60 мм/с), которые соответствуют диапазону, характерному для капель аналогичного размера при сопоставимых температурных градиентах [52,99,124–129]. Такое соответствие закономерностям, установленным в [58,118,130,131], верифицируют использованную экспериментальную методику и подтверждают точность измерительного комплекса. Все элементы экспериментальной установки от системы термостатирования поверхности до трассирующих частиц и алгоритмов обработки PIV обеспечили получение достоверных данных.

Для супергидрофобной поверхности (рисунок 3.14б) характерна принципиально иная картина конвективных течений по сравнению с гидрофильными полированными поверхностями (рисунок 3.14а). Конвективные потоки на SHPho организованы в виде крупномасштабного циркуляционного течения, направленного от одной границы капли к другой, что обусловлено смачиваемостью поверхности. Из-за крайне ограниченной площади реального контакта между каплей и нагретой поверхностью (составляющей лишь несколько процентов от геометрической площади благодаря воздушным карманам в микротекстуре), процесс теплопередачи существенно затруднен. В результате прогревается значительно меньший объем жидкости, который, вследствие термического расширения и градиента плотности, движется вверх, формируя один доминирующий и устойчивый вихрь. Согласно полученным данным PIV-визуализации, зоны максимальных скоростей течения (достигающих 1,1–2,1 мм/с) сконцентрированы вблизи поверхности раздела жидкость/воздух, где термические градиенты являются наиболее выраженными. Эта характерная особенность дополнительно подчеркивается интенсивным испарением именно в области мениска, что создает дополнительные конвективные потоки и способствует стабилизации единой вихревой структуры. Важно отметить, что наблюдаемая картина

течений согласуется с известными литературными данными [132–135] для супергидрофобных поверхностей, что подтверждает адекватность применяемой методики исследования так же, как и результаты PIV на полированной поверхности Polished (рисунок 3.14а).

Анализ данных (рисунок 3.14в–3.14ж) показывает, что супергидрофобные зоны на бифильных поверхностях (Ext_{16} , Ext_{23} , Ext_{31} , Ext_{41} , Ext_{54}) выступают в качестве источников пространственной неустойчивости поля скорости, существенно изменяя структуру конвективных потоков. На поверхностях со степенью гидрофобизации до 25 % (Ext_{16} , Ext_{23}) изолированные супергидрофобные области вызывают локальное увеличение средней скорости движения конвективных потоков, создавая характерные зоны интенсификации теплообмена. В противоположность этому, на поверхностях со степенью гидрофобизации более 25 % (Ext_{31} , Ext_{41} , Ext_{54}), супергидрофобные области, занимающие значительную часть поверхности, не демонстрируют выраженного повышения локальных скоростей, что обусловлено формированием протяженных зон с подавленным тепловым взаимодействием. Вследствие взаимного влияния разнородных поверхностных свойств, супергидрофобные участки инициируют образование множественных вихревых структур в приповерхностном слое жидкости, которые характеризуются выраженной временной и пространственной изменчивостью и не формируют устойчивого режима конвективного течения.

Супергидрофобные участки оказывают влияние на динамику линии трехфазного контакта в процессе прогрева и испарения капли (рисунок 3.12). Наблюдается выраженное движение ЛТК от периферии к центру, причем траектория этого движения демонстрирует сильную зависимость от поверхностной гетерогенности. Линия трехфазного контакта «зацепляется» за гидрофильные области и одновременно огибает супергидрофобные участки, что приводит к формированию сложной неравномерной конфигурации мениска. Завершающая стадия испарения капли на бифильных

поверхностях серии-Ext реализуется в режиме постоянного диаметра, сопровождающемся прогрессирующим уменьшением контактного угла. В финальной фазе процесса остаточный объем жидкости растекается, формируя тонкую прерывистую пленку. Типичное изображение последнего приведено на рисунке 3.15 в момент времени $t = 120$ с. Данное явление демонстрирует сложное взаимодействие между капиллярными силами, силами поверхностного натяжения и гетерогенностью поверхности, определяющее конечную стадию эволюции капли.

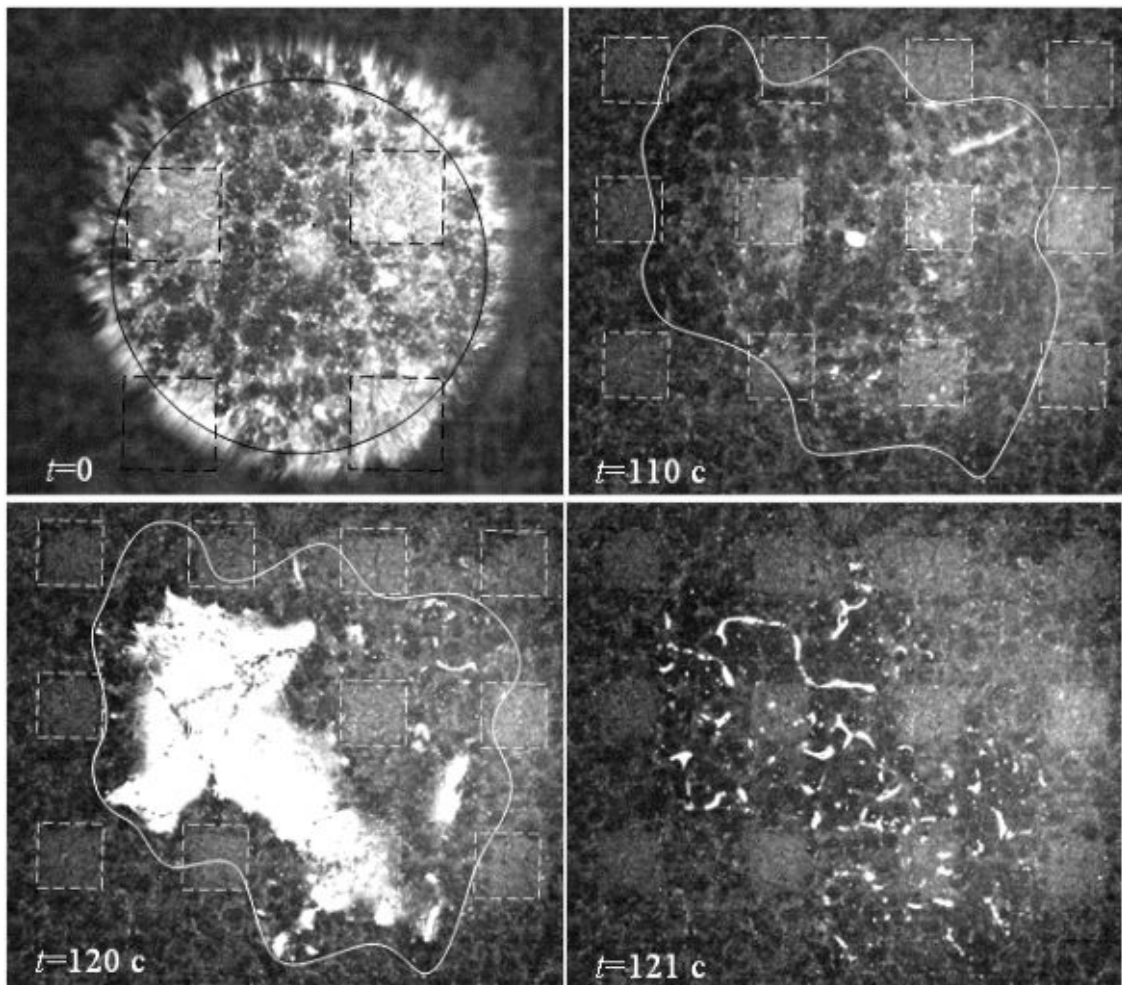


Рисунок 3.15 – Типичное фотоизображение капли на поверхности Ext₂₃ в процессе испарения при температуре 80 °С

Анализ средних и максимальных значений скоростей конвекции на рисунке 3.16 при прогреве капли на поверхностях Polished, SHPho и

бифильных поверхностях с различной степенью гидрофобизации (Ext₁₆, Ext₂₃, Ext₃₁, Ext₄₁, Ext₅₄) выявил различия в эволюции конвективных потоков. На поверхностях Polished, SHPho и бифильных поверхностях со степенью гидрофобизации до 25 % (Ext₁₆, Ext₂₃) начальная стадия процесса испарения характеризуется максимальными значениями скоростей конвективных потоков (рисунок 3.16), что непосредственно связано с наличием наиболее значительного градиента температуры по высоте капли в этот период, что было подтверждено измерениями методом PLIF. По мере прогрева капли и уменьшения термического градиента происходит снижение интенсивности конвекции. Однако на поверхностях со степенью гидрофобизации более 25 % (Ext₃₁, Ext₄₁, Ext₅₄) наблюдается иной характер изменения скорости потоков. После начального периода снижения при достижении 40–50 % от общего времени испарения капли происходит возрастание скорости конвекции с последующим плавным снижением и выходом на стабильное плато. Объяснение данного явления заключается в постепенном прогреве объемов жидкости, аккумулированных над супергидрофобными участками, и последующей активации марангоновской конвекции при достижении критических градиентов температуры. Примечательно, что большее значение скорости конвективных потоков на поверхности SHPho по сравнению с полированной поверхностью в период испарения объясняется большей высотой капли на поверхности с супергидрофобными свойствами, что замедляет прогрев всей массы жидкости и сохраняет значительный градиент температуры по высоте капли в течение более продолжительного времени. Этот эффект дополнительно усиливается наличием воздушной прослойки, выполняющей функцию термического барьера и способствующей сохранению пространственной неоднородности температурного поля.

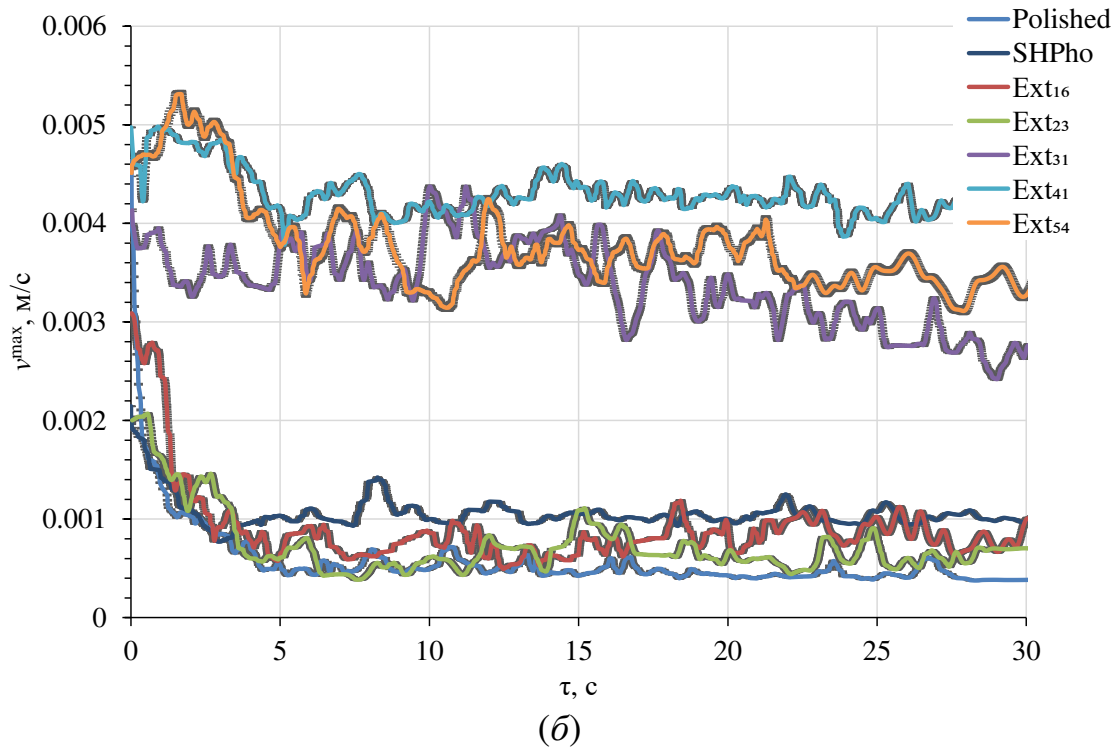
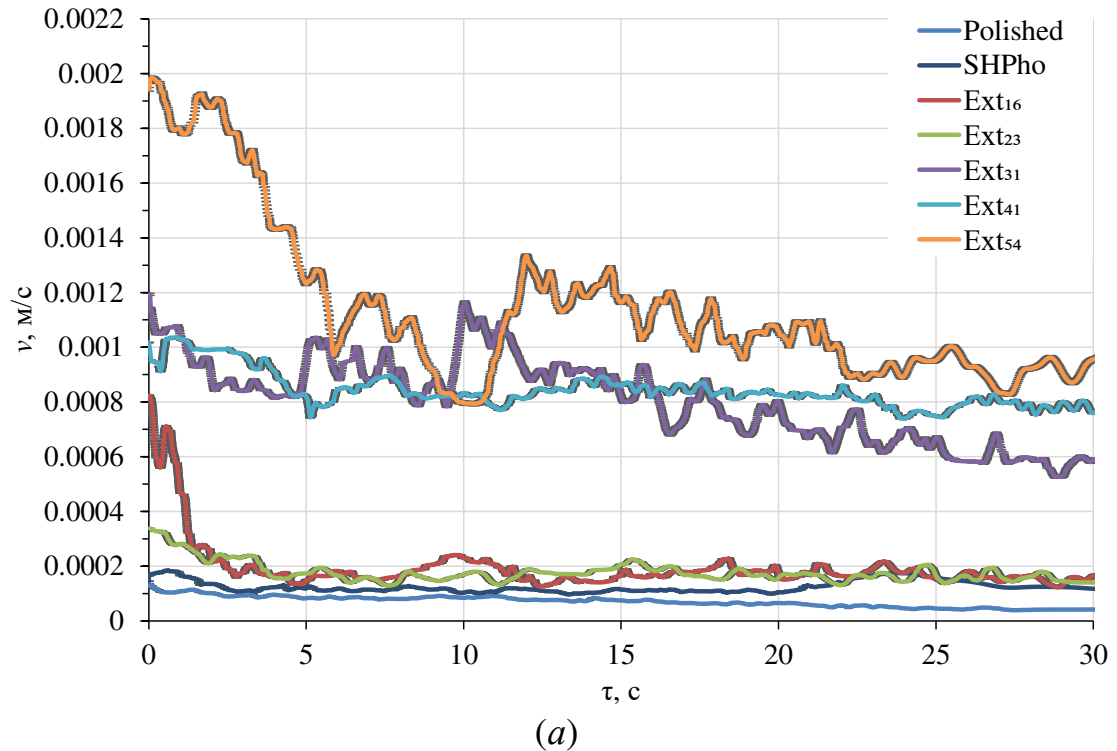


Рисунок 3.16 – Временные тренды скоростей конвективных потоков в процессе прогрева: *a* – усредненных; *б* – максимальных

Для бифильных поверхностей Ext-серии зарегистрировано значительное усиление конвективных процессов по сравнению с полированной поверхностью Polished. Средние скорости конвективных потоков на таких поверхностях превышают аналогичные показатели для

Polished в 3–10 раз (рисунок 3.17), что свидетельствует о принципиально ином механизме тепло- и массообмена. Примечательно, что для поверхностей со степенью гидрофобизации менее 25 % (Ext₁₆ и Ext₂₃) средние значения скоростей конвективных потоков оказываются сопоставимыми между собой, однако примерно на 30 % ниже, чем для полностью супергидрофобной поверхности SHPho. Напротив, поверхности со степенью гидрофобизации более 25 % (Ext₃₁, Ext₄₁, Ext₅₄) демонстрируют еще более выраженный эффект, средние скорости конвекции достигают значений, в 1,2–2,4 раза превышающих показатели SHPho. Столь существенное увеличение интенсивности конвективных потоков объясняется синергетическим эффектом от взаимодействия супергидрофильных и супергидрофобных зон, которые создают пространственную неоднородность температурного поля и градиентов поверхностного натяжения, что приводит к развитию мощных марангоновских течений и формированию сложной вихревой структуры. Важно отметить, что максимальная интенсивность конвекции наблюдается в области границ раздела между супергидрофильными и супергидрофобными участками, где возникают локальные перепады температуры и поверхностного натяжения, выступающие движущей силой для формирования высокоскоростных потоков. Данное явление открывает новые возможности для управления теплообменными процессами посредством целенаправленного проектирования поверхности с заданным распределением зон с различной смачиваемостью.

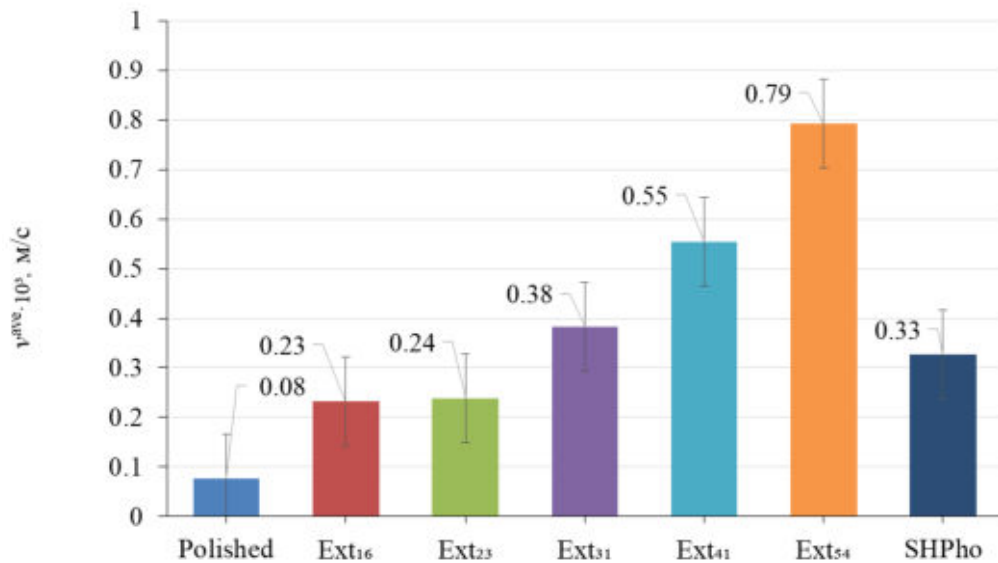


Рисунок 3.17 – Средние скорости конвективных потоков в капле воды объемом 5 мкл

Результаты, полученные методом PIV, наглядно демонстрируют, что в испаряющейся капле воды объемом 5 мкл конвективные процессы значительно более развиты на бифильных поверхностях с экстремальными свойствами смачивания по сравнению с полированными поверхностями. Интенсивная конвекция, характеризующаяся повышенными скоростями потоков и сложной пространственной организацией вихревых структур, является прямым свидетельством более эффективного переноса теплоты внутри капли. Установлено, что средние скорости конвективных потоков на бифильных поверхностях превышают аналогичные показатели для полированной поверхности в 3–10 раз, что обусловлено синергетическим эффектом от взаимодействия супергидрофильных и супергидрофобных зон, создающих пространственную неоднородность температурного поля и градиентов поверхностного натяжения. Такая интенсификация теплообмена приводит к существенному улучшению охлаждения поверхности, обусловленной испарением капли. Более развитая конвекция в капле обеспечивает эффективный отвод теплоты от поверхности, что подтверждается измерениями температуры методом PLIF и данными об

«эффекте охлаждения», зарегистрированном с помощью микротермопар. Следовательно, поверхность под каплей за счет испарения охлаждается значительно лучше на бифильных поверхностях по сравнению с полированной. Полученные результаты убедительно свидетельствуют о том, что бифильные поверхности с экстремальными свойствами смачивания перспективны в процессах теплоотвода в высокоэффективных системах охлаждения электроники и энергетического оборудования.

3.2.4 Температурные поля в капле, неоднородность, связь с пространственным распределением смачиваемости

При проведении экспериментов выявлены ограничения применения метода PLIF для измерения температурных полей в каплях в рассматриваемых условиях. Первым наиболее существенным ограничением является образование паровых пузырей на поверхностях, особенно выраженное на бифильных поверхностях Ext-серии. Формирование и рост паровых пузырей внутри капли вызывает преломления лазерного луча, что приводит к искажениям регистрируемого сигнала и, как следствие, к получению недостоверных температурных полей. Вторым ограничением является необходимость исключения деформации поверхности испаряющейся капли. Капля воды начинает мгновенно прогреваться после соприкосновения с нагретой поверхностью. Корректная регистрация температуры возможна только после удаления наконечника дозатора из зоны измерения, что создает дополнительные требования к синхронизации измерительной системы. Третьим ограничением является невозможность получения достоверных значений температуры в непосредственной близости от линии трехфазного контакта. Последнее обусловлено преломлением лазерного луча в области мениска, нестационарностью границы раздела фаз, а также особенностью температурной зависимости светимости флуорофора Rhodamine B. При обработке экспериментальных данных устанавливался

порог светимости, с помощью которого маскировался фон вокруг капли. Но вследствие того, что интенсивность свечения флуорофора обратно пропорциональна температуре, после нагрева поверхности регистрируемое температурное поле в приповерхностной области подвергается «размыванию». Как следствие, области с низкой светимостью пикселей, соответствующие как фоновому излучению, так и зонам с повышенной температурой, могут некорректно интерпретироваться при обработке данных, что вносит погрешность в определение температурных полей, особенно вблизи границы раздела фаз.

Значения температуры в сечении капли вблизи поверхности нагрева, а также в профильном сечении по центру капли приведены на рисунке 3.18.

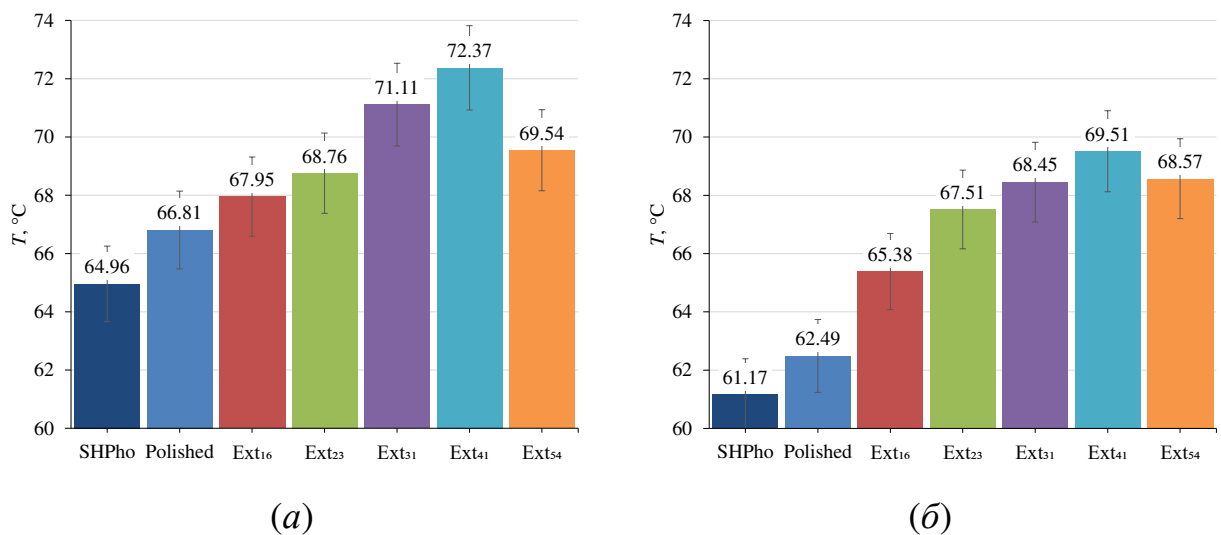


Рисунок 3.18 – Значения температуры при $T_s=80$ °C: *a* – в сечении капли вблизи поверхности нагрева; *б* – в профильном сечении по центру капли

Установлено, что капли на полированной (Polished) и супергидрофобной (SHPho) поверхностях характеризуются относительно низкой скоростью прогрева по сравнению с каплями на бифильных поверхностях Ext-серии, причем скорости нагрева на бифильных поверхностях более чем на 20 % выше по сравнению с полированной поверхностью. Наблюдается зависимость между степенью гидрофобизации и эффективностью теплопереноса на бифильных поверхностях Ext-серии.

Наибольшие скорости прогрева зарегистрированы для поверхностей Ext₃₁ и Ext₄₁ со степенью гидрофобизации 31,2 % и 41,0 %, соответственно, что объясняется оптимальным сочетанием супергидрофильных зон, обеспечивающих прямой контакт и интенсивный контактный теплообмен, и супергидрофобных участков, способствующих развитию термокапиллярной конвекции. При дальнейшем увеличении степени гидрофобизации (Ext₅₄, 53,8 %) скорость прогрева снижается вследствие уменьшения площади теплового контакта, демонстрируя нелинейный характер зависимости и наличие оптимального диапазона степени гидрофобизации (30–45 %) для эффективного теплопереноса.

Все поверхности демонстрируют выраженный температурный градиент между приповерхностным слоем (рисунок 3.18а) и центральной частью капли (рисунок 3.18б) (разница до 3 °С), что подтверждает наличие активного теплообмена и коррелирует с данными PIV о развитых конвективных потоках. Поверхностям Ext₃₁ и Ext₄₁ характерны максимальные значения температуры как в приповерхностном слое (71,11–72,37 °С), так и в центральном сечении (68,45–69,51 °С). Это свидетельствует о наиболее эффективном теплопереносе и соответствует ранее зарегистрированным скоростям конвективных потоков на этих поверхностях, превышающим показатели полированной поверхности до 10 раз (рисунки 3.14, 3.16, 3.17). Супергидрофобная поверхность SHPho, несмотря на высокие скорости конвективных потоков внутри капли относительно полированной поверхности (рисунки 3.14, 3.16, 3.17), характеризуется более низкими температурами в сечении капли вблизи поверхности нагрева, а также в профильном сечении по центру капли (рисунок 3.18). Последнее объясняется минимальной площадью контакта «жидкость/поверхность нагрева».

Анализ зарегистрированных видеogramм и температурных полей, полученных с применением метода PLIF, а также данных, полученных методом PIV, позволил установить особенности нагрева капли, расположенной на бифильных поверхностях Ext-серии. Эти особенности

закljučаются в том, что в одном сечении капли воды температурное поле на бифильных поверхностях неоднородно, в отличие от однородного температурного поля на полированной и супергидрофобной поверхности. Локальные области неоднородности температурных полей достаточно хорошо совпадают с конвективными потоками, возникающими в супергидрофобных участках бифильных поверхностей. Неоднородности температурного поля являются центрами интенсификации термогравитационных конвективных течений. Установлено, что с ростом степени гидрофобизации бифильных поверхностей (под степенью гидрофобизации мы понимаем процент площади поверхности, занятой супергидрофобными участками) растет и неоднородность температурных полей в одном сечении, увеличивается и градиент температуры в капле воды. Бифильные поверхности Ext-серии со степенью гидрофобизации от 30 % до 45 % (Ext₃₁, Ext₄₁) демонстрируют наилучшие характеристики теплопереноса, сочетая достаточную площадь контакта через гидрофильные зоны, развитую конвекцию за счет термокапиллярных эффектов на границах раздела и эффективное прогревание объема жидкости, что подтверждается как PLIF-измерениями, так и PIV-визуализацией. Полученные результаты доказывают, что поверхности с контролируемым соотношением супергидрофильных/ супергидрофобных зон Ext-серии обеспечивают усиленный конвективный теплообмен, оптимальное сочетание скорости испарения и эффективности охлаждения, что открывает перспективы для их применения в высокоэффективных системах охлаждения теплонагруженного микроэлектронного оборудования. Данные PLIF-измерений согласуются с ранее полученными результатами по испарению и PIV-визуализации, формируя комплексную картину теплообменных процессов на бифильных поверхностях с экстремальным смачиванием.

3.2.5 Оценка термокапиллярного течения (Марангони) и релеевской конвекции

Число Марангони характеризует соотношение термокапиллярных сил, возникающих из-за градиента поверхностного натяжения вдоль границы раздела фаз, к силам вязкости. Число Релея определяет соотношение подъемной силы (силы Архимеда), обусловленной градиентом плотности в поле тяжести, к силам вязкой диссипации и теплопроводности. Градиент для числа Марангони возникает вдоль свободной поверхности капли (жидкость-воздух) из-за неравномерного нагрева, в то время как для числа Релея в объеме жидкости по вертикали (от нагретой поверхности к вершине (апексу) капли) из-за разности плотностей.

Число Марангони определяется по формуле:

$$\text{Ma} = \left(\left| \frac{d\sigma}{dT_S} \right| \cdot \Delta T \cdot L \right) / \rho \cdot \nu \cdot a. \quad (3.6)$$

Число Релея определяется по формуле:

$$\text{Ra} = g \cdot \beta \cdot \Delta T \cdot L^3 / (\nu \cdot a), \quad (3.7)$$

где $d\sigma/dT_S$ – температурный коэффициент поверхностного натяжения. Для воды в диапазоне температур 60–80 °C принимается постоянной $1,7 \cdot 10^{-4}$; ΔT – характерный перепад температуры, (K); L – характерный линейный размер, (м); ρ – плотность жидкости, (кг/м³); ν – кинематическая вязкость, (м²/с); a – температуропроводность, (м²/с); g – ускорение свободного падения, 9,81 м/с²; β – коэффициент термического расширения жидкости, (1/K).

При расчете числа Релея в качестве характерного линейного размера принимается высота капли (h). В случае числа Марангони известные данные противоречивы. В одних работах, например, в статье [136], для расчета Ma используется высота капли. В других, как в работе [137], может

использоваться либо радиус (диаметр) капли, либо ее высота. Выбор характерного размера зависит от многих факторов, включая условия эксперимента, степень растекания капли, ее геометрию и доминирующее направление градиента поверхностного натяжения. В расчетах для числа Марангони была принята высота капли (h). Основная причина этого выбора заключается в том, что капля объемом 5 мкл на исследуемых поверхностях (особенно на супергидрофобной и всей серии Ext) имеет относительно большую высоту и форму, близкую к сферическому сегменту, где вертикальный масштаб является определяющим для возникающего температурного градиента между основанием и верхней частью (апексом) капли, который и вызывает термокапиллярное течение.

Для расчета характерного перепада температуры (между основанием и наиболее холодной частью капли) взяты экспериментальные значения (рисунок 3.18), полученные методом PLIF для каждой поверхности, в сечении у нагретой поверхности и в профильном сечении по центру капли. Для расчета числа Релея и Марангони, необходимо использовать температуру у вершины (апекса) капли. Однако таких данных получить не удалось по следующим причинам. При проведении экспериментов методом PLIF были определены только значения температур в сечении капли вблизи поверхности нагрева, а также в профильном сечении по центру капли. К сожалению, не удалось установить значения температур вблизи вершины капли. Последнее связано с преломлением лазерного ножа и искажениями регистрируемого сигнала. Из-за наибольшей кривизны вблизи вершины капли лазерный нож пересекает ее и значительно искажается. Поскольку видеокамера установлена перпендикулярно поверхности, на которой расположена капля, это приводит к искажениям регистрируемой величины и достоверно зарегистрировать температуру в этом сечении не представляется возможным. При этом, из-за интенсивного испарения капли и ее уменьшения по высоте относительно поверхности, происходит постепенное искажение лазерного ножа и его выход из капли за относительно короткий промежуток

времени. Цель расчета чисел Марангони и Релея не получить абсолютно точное значение для каждой капли, а провести корректное сравнение Ma и её соотношения с Ra , для оценки относительного вклада и преобладания термокапиллярных сил над силами плавучести в формировании конвекции внутри капли. Для данной цели использование измеренных температур у поверхности и в центре капли, характеризующих общий вертикальный перепад, является допустимым и информативным. Величины, входящие в формулы (плотность ρ , коэффициент теплового расширения β , кинематическая вязкость ν , температуропроводность a , температурный коэффициент поверхностного натяжения $d\gamma/dT$), были приняты по справочным данным для воды и рассчитаны для средней температуры $T_{avg} = (T_s + T_{top})/2$ для каждой капли путем интерполяции между табличными значениями при 60 °C и 80 °C из источников [138]. Результаты оценочных расчетов представлены в таблице 3.3.

Таблица 3.3 – Результаты расчётов безразмерных чисел Марангони и Релея

Текст ура	T_s , °C	T_{top} , °C	ΔT , °C	$h \cdot 10^3$, м	T_{avg} , °C	ρ , кг/м ³	$\beta \cdot 10^4$, 1/K	$\nu \cdot 10^7$, м ² /с	$a \cdot 10^7$, м ² /с	Ma · 10 ⁻³	Ra	Ma / Ra
Polished	66,8	62,5	4,3	1,3	64,7	980,7	5,38	4,46	1,61	13,1	625	21,0
SHPHo	65,0	61,2	3,8	1,9	63,1	981,9	5,29	4,53	1,61	17,2	1860	9,2
Ext₅₄	69,5	68,6	1,0	1,8	69,1	978,4	5,63	4,09	1,63	2,4	108	22,3
Ext₄₁	72,4	69,5	2,9	1,6	70,9	976,3	5,81	3,97	1,64	7,8	310	25,1
Ext₃₁	71,1	68,5	2,7	1,6	69,8	977,6	5,68	4,06	1,63	7,1	279	25,3
Ext₂₃	68,8	67,5	1,3	1,5	68,1	979,0	5,52	4,22	1,62	3,3	122	26,9
Ext₁₆	68,0	65,4	2,6	1,5	66,7	980,0	5,45	4,34	1,62	6,9	257	26,8

Во всех случаях отношение Ma/Ra значительно превышает 1, что количественно подтверждает преобладание конвекции Марангони над конвекцией Релея и результаты в разделе 3.2.3, сформулированные на основе анализа данных PIV.

3.2.6 Оценка влияния приповерхностных свойств поверхностей теплообмена на эффективность охлаждения

На рисунке 3.19 представлены экспериментальные зависимости, демонстрирующие снижение температуры в приповерхностном слое образца из алюминиево-магниевого сплава АМг3 на толщине 500 мкм, вызванного испарением, капли дистиллированной воды объемом 5 мкл, относительно начальной температуры поверхности. Момент наступления эффекта Лейденфроста определяли визуально по появлению устойчивой паровой прослойки, исключающей непосредственный контакт жидкости с поверхностью, что фиксировалось с помощью высокоскоростной видеосъемки и коррелировало с выходом зависимости $\Delta T_{\max} = f(T_s)$ (рисунок 3.19) на постоянное значение. Капля воды дозировалась в область расположения спая термопары на предварительно нагретую до заданной температуры поверхность. Исследования выполнены в диапазоне температур от 80 °С до 300 °С, что позволило проследить эволюцию теплоотвода при переходе от конвективного испарения к пленочному кипению (кризису теплообмена – эффекту Лейденфроста). Полученные зависимости (рисунок 3.19) демонстрируют сложный немонотонный характер влияния модификации поверхности, включая текстуру и контраст смачивания, на интенсивность теплоотвода за счет фазового перехода капли воды, причем физические механизмы теплообмена принципиально меняются в различных температурных диапазонах. Кривые на рисунке 3.19 имеют характерный параболический вид с нисходящими ветвями и последующим выходом на плато, что отражает последовательную смену процессов взаимодействия теплоносителя с поверхностью. При температуре поверхности 80 °С реализуется интенсивное испарение с сохранением геометрической формы капли. В диапазоне от 100 °С до температур, соответствующих экстремуму на зависимостях рисунка 3.19 (например, 140 °С для полированной поверхности и 160 °С для поверхностей Ext-серии), наблюдается переход к

кипению с активной нуклеацией паровых пузырей, что значительно интенсифицирует теплообмен и изменяет геометрическую форму капли. В интервале от температуры экстремума до выхода кривой на плато (например, 140–180 °С для полированной поверхности и 160–195 °С для поверхностей Ext-серии), развивается переходный процесс, характеризующийся неустойчивым поведением капли. При температурах, соответствующих плато на кривых рисунка 3.19, наступает кризис теплообмена (эффект Лейденфроста), при котором формируется паровая пленка, изолирующая жидкость от поверхности и приводящая к резкому снижению эффективности теплоотвода.

Далее представлены результаты анализа сравнения характеристик охлаждения, а именно, сопоставление эффективности охлаждения бифильных поверхностей Ext-серии с полированным образцом (рисунок 3.19а), оценка теплоотводящих свойств поверхностей Phi-серии относительно полированной (рисунок 3.19б), а также сравнение экстремальных случаев смачиваемости (супергидрофильной SHPhi и супергидрофобной SHPho поверхностей) и наиболее эффективных бифильных поверхностей (Ext₄₁ и Phi₁₃) с полированным Polished (рисунок 3.19в). Такой многоуровневый подход сравнения характеристик охлаждения позволил выявить не только абсолютные значения эффективности в виде ΔT_{max} , но и установить влияние пространственного распределения зон с различной смачиваемостью на динамику теплообмена в широком температурном диапазоне.

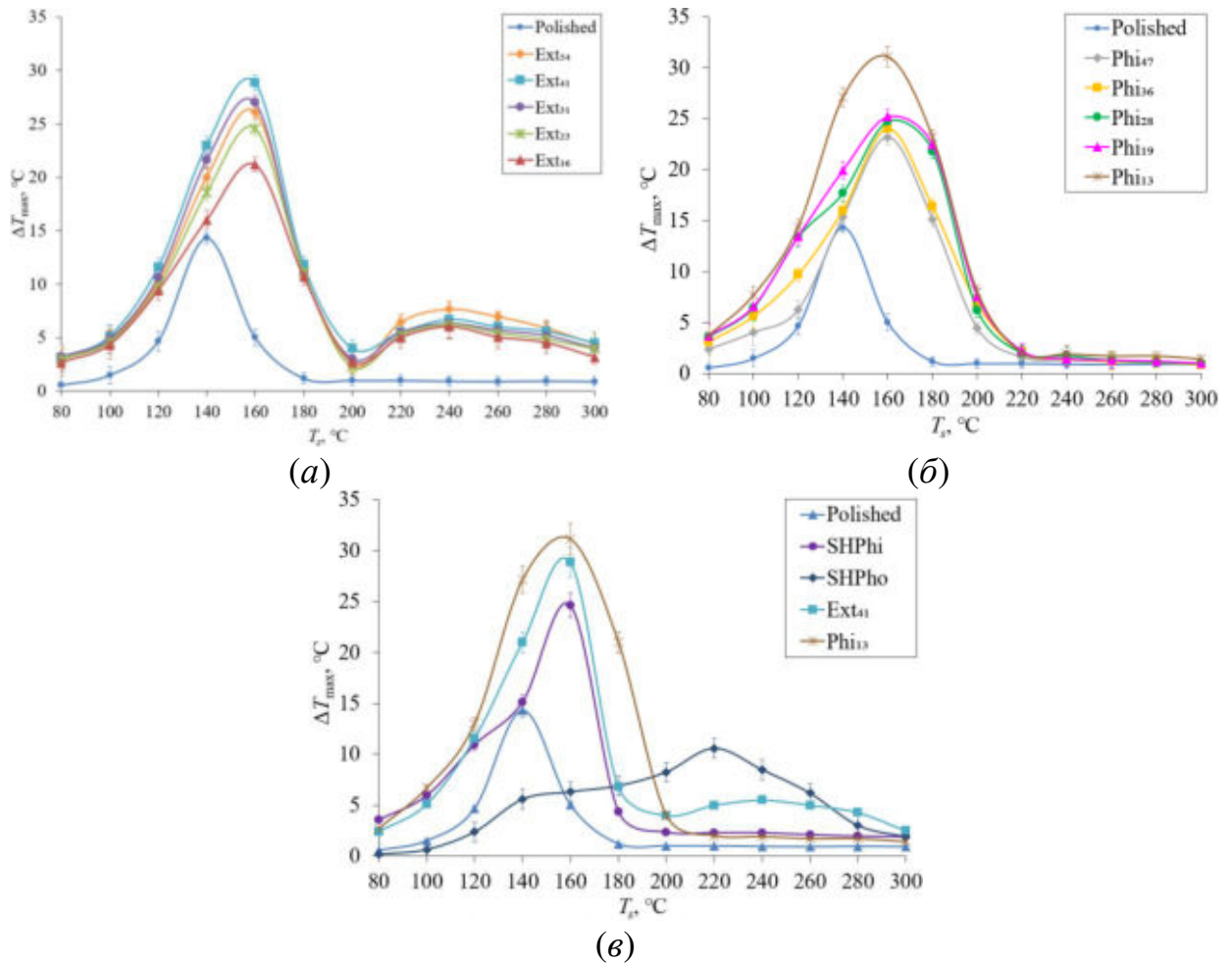


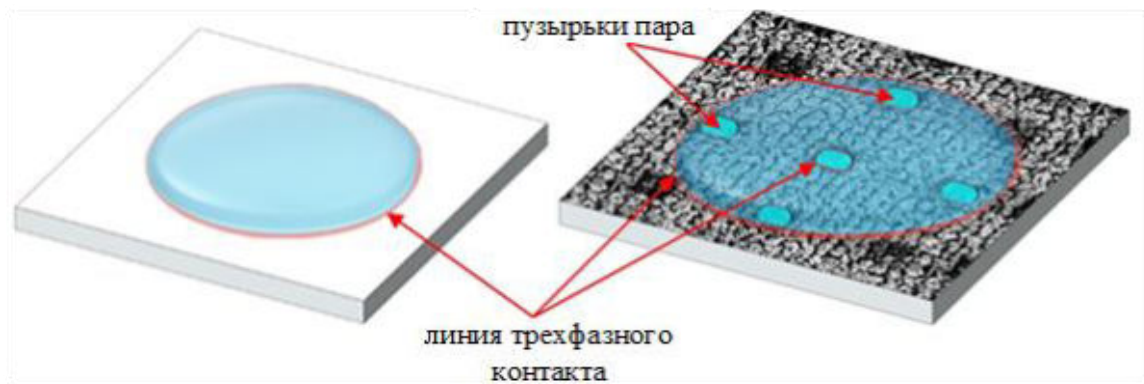
Рисунок 3.19 – Зависимости, иллюстрирующие снижение температуры в приповерхностном слое (на толщине 500 мкм), вызванное испарением капли дистиллированной воды объемом 5 мкл, от начальной температуры поверхности: *a* – поверхности с супергидрофобными и супергидрофильными зонами (Ext-серия); *б* – поверхности с комбинацией гидрофильных и супергидрофильных зон (Phi-серия); *в* – эффективность охлаждения структурированных поверхностей (SHPhi, SHPho, Ext₄₁, Phi₁₃) с полированной (Polished)

Полученные экспериментальные данные, свидетельствующие о реализации эффекта Лейденфроста (кризиса теплообмена) на полированной поверхности алюминиево-магниевого сплава АМг3 при температуре около 180 °С (рисунок 3.19), демонстрируют хорошее соответствие с данными в [11,94,139,140]. Это согласование не только подтверждает корректность использованной в экспериментах методики, но и адекватность данных о

реализации эффекта Лейденфроста на структурированных поверхностях, а также данных о снижении температуры (ΔT_{max}), вызванного испарением капли.

Для поверхностей Ext-серии с комбинацией супергидрофобных и супергидрофильных зон установлено наилучшее соотношение площадей (30–45 % супергидрофобной поверхности), при котором достигается наибольшая эффективность охлаждения (рисунок 3.19a). Поверхности Ext₄₁ и Ext₃₁ демонстрируют лучшие показатели по снижению температуры, превосходя полированную поверхность на 11–81 % в области температур от 80 °С до 140 °С, на 11–90 % в области от 140 °С до 190 °С и на 63–88 % в области от 190 °С до 285 °С. Данные по значениям снижения температуры в приповерхностном слое при нагреве до 80 °С согласуются с результатами, полученными методами PIV, PLIF и подтверждают выводы о том, что структурированные поверхности Ext-серии со степенью гидрофобизации от 30 % до 45 % (Ext₃₁, Ext₄₁) демонстрируют лучшие характеристики теплопереноса в сравнении с полированной поверхностью. Этот результат является доказательством того, что скорость испарения не может служить единственным критерием оценки эффективности охлаждения на поверхностях с развитой многомодальной шероховатостью и контрастным смачиванием. Несмотря на сниженную на 29–74 % скорость испарения по сравнению с полированной поверхностью (рисунок 3.13), бифильные поверхности Ext - серии обеспечивают на 79–81 % большее снижение температуры в приповерхностном слое на толщине 500 мкм при температуре нагрева 80 °С. Этот эффект объясняется тем, что основной вклад в теплоотвод вносит не фазовый переход с поверхности раздела «жидкость – окружающая среда», а увеличение длины линии трехфазного контакта и конвекция, инициируемая пространственной неоднородностью смачиваемости. Увеличение длины трехфазной контактной линии обусловлено наличием супергидрофобных участков под каплей

(рисунок 3.20), где формируются воздушные карманы, создающие дополнительные периметры испарения.



(а)

(б)

Рисунок 3.20 – Схематическое представление эффекта формирования воздушных карманов, создающих дополнительные периметры испарения (объекты изображены схематично и не нарисованы в масштабе). Капля воды, испаряющаяся на поверхности, нагретой до 80 °С: а – полированной; б – бифильной, с комбинацией супергидрофобных и супергидрофильных зон

Именно за счет повышенного теплоотвода на протяженной линии трехфазного контакта, где происходит наиболее интенсивное испарение и теплоперенос, осуществляется эффективное охлаждение поверхностей Ect-серии при температуре около 80 °С. Этот механизм компенсирует уменьшение площади прямого контакта «жидкость – поверхность» и обеспечивает повышенные характеристики теплоотвода даже при сниженной общей скорости испарения.

В таблице 3.4 приведены результаты оценки длины трехфазной линии контакта, полученные с использованием разработанного оригинального графо-аналитического подхода.

Таблица 3.4 – Результаты оценки длины трехфазной линии контакта

Поверхность	Контактный диаметр капли объемом 5 мкл, d , мм	Длина трехфазной линии контакта, L , мм	Эффект охлаждения, ΔT_{max} , °C
SHPho	1,29	4,0	0,2
Polished	2,81	8,8	0,5
Ext ₅₄	1,52	14,2	2,6
Ext ₁₆	2,32	15,9	2,7
Ext ₂₃	2,25	17,8	2,9
Ext ₃₁	2,19	20,3	3,0
Ext ₄₁	2,15	22,5	3,2

Из таблицы 3.4 видно, что с ростом протяженности трехфазной линии контакта эффективность охлаждения поверхности (ΔT_{max}) нагретых до 80 °C, улучшается. Структурированные поверхности серии Ext с комбинацией супергидрофильных/супергидрофобных свойств обеспечивают значительное охлаждение поверхности (более чем в 6 раз 3,2/0,5, таблица 3.4) за счет испарения на них капли воды объемом 5 мкл в сравнении с полированной поверхностью с гидрофильными свойствами даже при относительно малых контактных диаметрах капли (2,81/2,15 \approx 1,3, таблица 3.4) и меньших удельных скоростях испарения (рисунок 3.19г). Последнее доказывает преобладание механизмов теплообмена на трехфазной линии контакта над процессами на поверхности раздела «жидкость (теплоноситель) – окружающая среда (воздух)». Данные в таблице 3.4, подтверждают вывод о том, что увеличение длины трехфазной линии контакта за счет создания контрастного смачивания является эффективным способом интенсификации охлаждения.

При температурах от 120 °C до 160 °C, зарегистрирован экстремум функции теплоотвода поверхностей Ext-серии. Степень гидрофобизации оказывает существенное влияние на эффективность охлаждения. Наибольшее влияние данного параметра зарегистрировано при температуре 160 °C, где

наблюдается корреляция между степенью гидрофобизации поверхностей Ext - серии и величиной ΔT_{max} . При анализе данных на рисунок 3.19a сформулировано заключение о том, что при температуре нагрева 160 °C последовательное увеличение степени супергидрофобных зон с 16 % до 23 %, 31 % и 41 % сопровождается соответствующим ростом эффективности охлаждения, снижение температуры поверхности составляет 21,2 °C, 24,6 °C, 27,0 °C и 28,8 °C. Линейная аппроксимация этих данных показывает, что каждый дополнительный процент гидрофобизации поверхностей Ext-серии обеспечивает прирост эффективности охлаждения приблизительно на 0,3 °C. Однако дальнейшее увеличение степени гидрофобизации с 41 % до 54 % приводит к снижению эффективности охлаждения с 28,8 °C до 26,1 °C (при температуре нагрева 160 °C), что указывает на существование оптимального предела степени гидрофобизации для интенсификации процессов теплообмена. Этот нелинейный характер зависимости позволяет предположить, что при превышении значения степени гидрофобизации (около 50 %) негативный эффект от уменьшения площади непосредственного контакта «жидкость – поверхность нагрева» начинает доминировать над положительным эффектом, связанным с увеличением длины трехфазной контактной линии. Такое поведение объясняется тем, что чрезмерное увеличение доли супергидрофобных зон приводит к формированию сплошных областей с ограниченным тепловым контактом под каплей, где воздушные карманы действуют как тепловой барьер, снижая общую эффективность теплообмена, несмотря на развитие интенсивной конвекции и увеличение периметра испарения (длины линии трехфазного контакта). Теплопроводность воздуха в несколько раз ниже аналогичного показателя для жидкости и материала поверхности.

На рисунке 3.19a показано, что в диапазоне температуры от 160 °C до 195 °C происходит постепенное снижение эффективности охлаждения поверхностей Ext-серии. При температурах около 195 °C и выше реализуется кризис теплообмена. В двух температурных диапазонах от 100 °C до 120 °C и

от 180 °С до 300 °С различия эффективности охлаждения (величиной ΔT_{max}) между поверхностями Ext-серии являются статистически незначительными и находятся в пределах доверительного интервала измерений. Последнее свидетельствует о сопоставимой эффективности теплоотвода и отсутствии значимого влияния супергидрофобного/супергидрофильного контраста поверхностей Ext-серии на процессы испарения в этих условиях (в двух температурных диапазонах от 100 °С до 120 °С и от 180 °С до 300 °С).

Аналогичная закономерность наблюдается и для структурированных поверхностей Phi-серии (рисунок 3.19б), где также отмечается превосходство охлаждающей способности над полированной поверхностью. Характерно, что вид кривых для поверхностей Phi-серии демонстрирует сходство с зависимостями для Ext-серии, а в диапазонах 80–120 °С и 200–300 °С различия между поверхностями Phi-серии остаются в пределах погрешности измерений. Это подтверждает общую закономерность, согласно которой влияние контраста смачивания (супергидрофобного/супергидрофильного и супергидрофильного/гидрофильного) становится существенным лишь в определенном температурном диапазоне – от 120 °С до 200 °С. На рисунок 3.19б видно, что наибольшее различие в эффекте охлаждения поверхностей Phi-серии наблюдается при температуре нагрева 160 °С. В этих условиях нагрева последовательное уменьшение степени гидрофильных зон с 28 % до 19 %, 13 % сопровождается соответствующим ростом эффективности охлаждения, снижение температуры поверхности, вызванное испарением, капли воды составляет 24,7 °С, 25,2 °С и 31,1 °С. Линейная аппроксимация этих данных показывает, что каждый дополнительный процент гидрофильной зоны поверхностей Phi-серии (в диапазоне от 13 % до 28 %) обеспечивает снижение эффективности охлаждения приблизительно на 0,4 °С.

На рисунке 3.19с показано, что поверхности Phi-серии демонстрируют наиболее интенсивное охлаждение за счет испарения капли воды по сравнению с другими исследуемыми образцами. Это превосходство

объясняется не только комбинацией супергидрофильных и гидрофильных свойств, но и значительно большей шероховатостью. Согласно рисунку 3.11, вследствие развитой шероховатости площадь поверхностей Phi-серии примерно в 7 раз превышает площадь полированной поверхности (параметр $Sdr \approx 700\%$). Для сравнения, у поверхностей Ext-серии шероховатость увеличивает площадь лишь в 6 раз (параметр $Sdr \approx 600\%$), что и обуславливает разницу в эффективности охлаждения.

Анализ зависимостей на рисунке 3.19с показывает, что, несмотря на однотипный параболический вид кривых снижения температуры $\Delta T_{\max} = f(T_s)$ для полированной (Polished), супергидрофильной (SHPhi), структурированных с супергидрофобным/супергидрофильным контрастом (Ext_{41}) и с супергидрофильным/гидрофильным контрастом (Phi_{13}) поверхностей, максимумы этих функций достигаются при различных температурах. Для полированной поверхности пик эффективности охлаждения наблюдается при $140\text{ }^\circ\text{C}$, тогда как для SHPhi, Ext_{41} и Phi_{13} наибольшее снижение температуры поверхностей зарегистрировано при $160\text{ }^\circ\text{C}$. Наиболее выраженное смещение температурного максимума зафиксировано для супергидрофобной поверхности (SHPho), где наивысшая эффективность охлаждения достигается при $220\text{ }^\circ\text{C}$. Такое различие в температурных оптимумах объясняется сменой режимов взаимодействия капли с поверхностью, которые установлены на основе анализа высокоскоростных видеозаписей с выделением шести режимов, обозначенных цветовыми маркерами (рисунке 3.21).

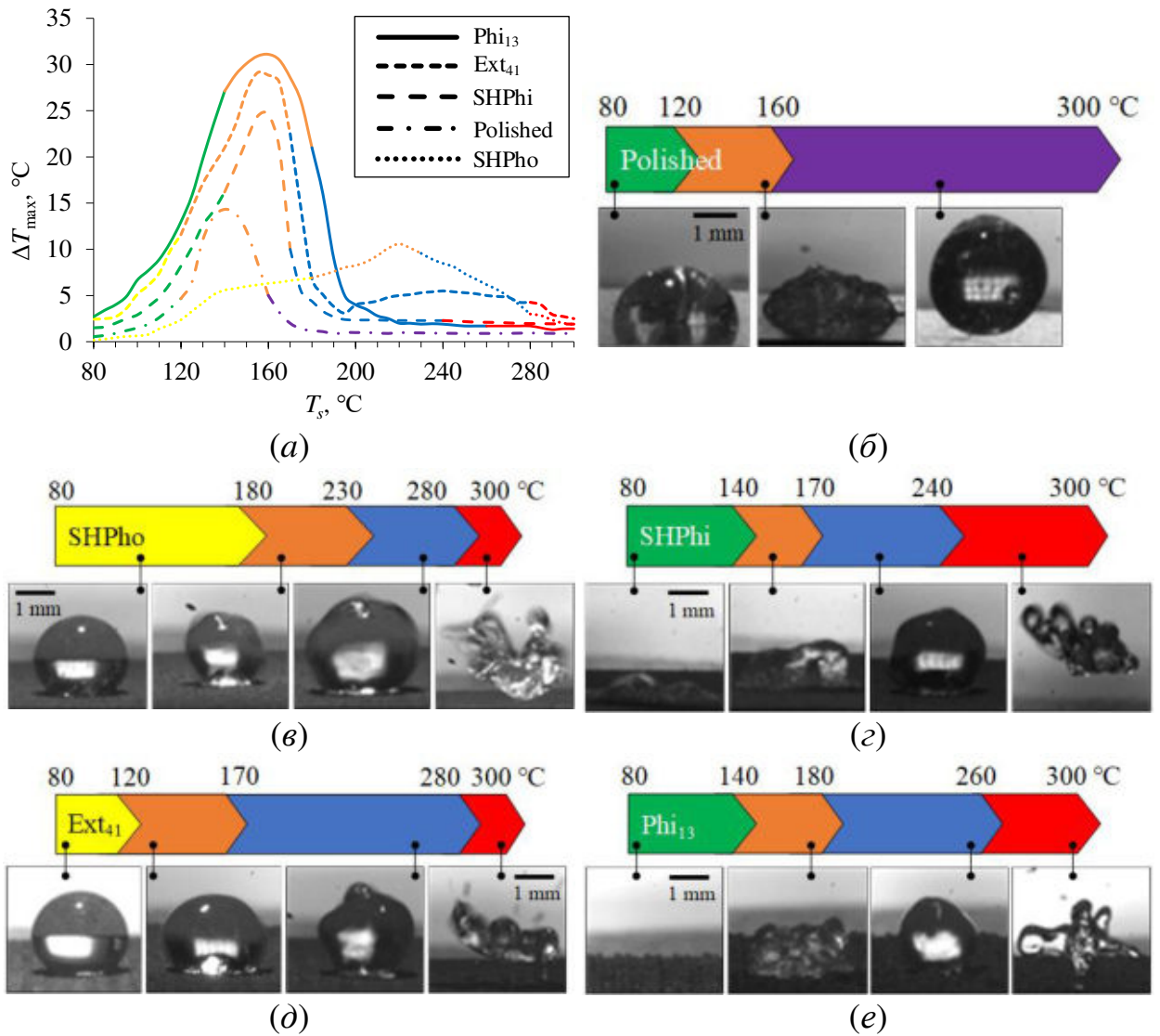


Рисунок 3.21 – Режимы взаимодействия капли с поверхностью:

a – зависимости изменения температуры в приповерхностном слое на толщине 500 мкм от поверхности в результате взаимодействия с каплей воды объемом 5 мкл; *б* – полированная поверхность; *в* – супергидрофобная поверхность; *г* – супергидрофильная поверхность; *д* – поверхность с комбинацией супергидрофильных/супергидрофобных свойств; *е* – поверхность с комбинацией супергидрофильных/гидрофильных свойств.

Цветом показаны режимы взаимодействия каплей воды с поверхностями: зеленый цвет – «осаждение капли/растекание»; желтый цвет – «испарение»; оранжевый цвет – «переходный режим»; синий цвет – «танец»; фиолетовый цвет – «кризис теплообмена» – «эффект Лейденфроста»;

красный цвет – «диспергирование»

Выделены следующие режимы взаимодействия капель и их критерии:

1. «Растекание». Зарегистрирован на гидрофильных и супергидрофильных поверхностях и сопровождается растеканием теплоносителя по поверхности с одновременным интенсивным испарением, нуклеацией паровых пузырей и возможным отрывом мелкодисперсных дочерних капель.

2. «Испарение». Характеризуется монотонным уменьшением геометрических размеров капли при сохранении её формы, несмотря на формирование внутри капли паровых пузырей и их рост. Характерно для поверхностей, содержащих супергидрофобные участки смачивания.

3. «Переходный режим». Проявляется в выраженной нестабильности поведения капли, включая многократные циклы отскока от поверхности и последующего восстановления контакта, что создаёт условия для динамического изменения механизмов теплообмена.

4. «Танец». Капля демонстрирует псевдостабильное состояние с постоянными колебаниями и деформациями геометрической формы под воздействием интенсивного кипения, постепенно уменьшаясь в размерах до полного испарения.

5. «Кризис теплообмена» – «эффект Лейденфроста». Является критическим режимом, с точки зрения эффективности теплоотвода. Характерен только для полированных поверхностей, без развитой шероховатости. Между теплоносителем и поверхностью формируется стабильная паровая прослойка, выступающая в роли теплового барьера (буферной зоны) и приводящая к резкому снижению интенсивности теплопереноса.

6. «Диспергирование». Сопровождается мгновенным разрушением исходной капли на множество мелкодисперсных дочерних фрагментов при контакте с перегретой поверхностью. Образовавшиеся вторичные капли могут многократно повторять процесс диспергирования при последующих контактах с поверхностью.

По результатам анализа режимов взаимодействия капель и зависимостей на рисунок 3.19*в* установлено, что в высокотемпературном диапазоне 200–260 °С супергидрофобные поверхности демонстрируют максимальную эффективность теплоотвода, хотя при дальнейшем повышении температуры наблюдается их деградация. Структурированные поверхности с экстремальными свойствами смачивания (Ext-серия) расширяют рабочий диапазон до 180 °С против 140 °С у полированных поверхностей, а в интервале 200–260 °С проявляют охлаждающий эффект, аналогичный супергидрофобным поверхностям, превосходя полированные и супергидрофильные поверхности по эффективности теплоотвода до 6 раз. В диапазоне до 200 °С наиболее перспективными являются бифильные поверхности с комбинацией гидрофильных и супергидрофильных свойств (Phi-серия), которые обеспечивают до 20-ти кратного повышение эффективности охлаждения в сравнении с полированными поверхностями и до 5-кратного превосходство над супергидрофильными поверхностями. Необходимо отметить, что достижение 20-ти кратного усиления охлаждения поверхностями Phi-серии обусловлено синергетическим взаимодействием высокой шероховатости и пространственного распределения смачиваемости. Увеличение площади поверхности (в 7 раз относительно полированной) является необходимым условием для такого значительного усиления теплообмена. Увеличенная площадь обеспечивает большую поверхность для контактного теплопереноса от поверхности к капле теплоносителя и создает развитую капиллярную структуру, способствующую растеканию и удержанию жидкости. Без такого уровня шероховатости достижение 20-ти кратного улучшения мало вероятно. Но только высокой шероховатости недостаточно для достижения такого результата по охлаждению. Распределение смачиваемости (чередование гидрофильных и супергидрофильных зон) также вносит существенный вклад в достижение 20-ти кратного улучшения. Супергидрофильные участки, впитывают теплоноситель, обеспечивая быстрый перенос теплоты, гидрофильные

способствуют удержанию объема жидкости. Такое чередование гидрофильных и супергидрофильных зон, способствует организации более эффективных внутренних потоков, обновляющих теплоноситель у нагретой поверхности. Полученные результаты подчеркивают важность учета режимов взаимодействия капли с поверхностью при проектировании высокоэффективных систем капельного охлаждения для электронных устройств.

Полученные результаты выполненных исследований являются основой для нового подхода к созданию структурированных поверхностей теплообмена с заданными функциональными свойствами. Такие поверхности могут быть спроектированы таким образом, чтобы направлять и удерживать капли теплоносителя именно в тех зонах микросхемы или энергетического оборудования, которые испытывают наибольшие тепловые нагрузки. Возможность управления временем жизни капли и интенсивностью локального охлаждения позволяет создавать адаптивные системы охлаждения теплонагруженного оборудования, эффективность которых будет на порядки выше традиционных решений.

Экспериментально установленные диапазоны эффективной работы разработанных поверхностей позволяют сформулировать следующие практические рекомендации. При температурах нагрева до 140 °С капля воды объемом 5 мкл охлаждает структурированные поверхности с развитой шероховатостью и экстремальным контрастом смачивания (комбинация супергидрофобных и супергидрофильных зон) более чем в шесть раз интенсивнее по сравнению с полированными аналогами, а в диапазоне от 140 °С до 190 °С это преимущество возрастает до 6,5 раза. Для температурного диапазона до 200 °С наиболее эффективными являются поверхности с комбинацией супергидрофильных и гидрофильных зон, которые обеспечивают до 20-ти кратного увеличения эффективности охлаждения по сравнению с полированной поверхностью. Такие поверхности найдут применение в системах охлаждения высокопроизводительных CPU,

GPU и TPU, где важна высокая интенсивность теплоотвода в диапазоне 80–160 °С.

В высокотемпературном диапазоне 200–260 °С наилучшие показатели демонстрируют супергидрофобные поверхности, а также структурированные поверхности с развитой шероховатостью и экстремальным контрастом смачивания. Их эффективность теплоотвода превосходит полированные, супергидрофильные поверхности и поверхности с комбинацией супергидрофильных и гидрофильных зон до 6 раз. Такие поверхности могут быть применимы в системах охлаждения силовой электроники (IGBT, MOSFET), где рабочие температуры достигают указанных значений.

Выводы по третьей главе

1.1. Установлены различия в реализации гидродинамических режимов испарения капель на полированных, лазерно-текстурированных поверхностях и LIS. На полированных, супергидрофобных и супергидрофильных поверхностях при температурах нагрева от 120 °С до температуры Лейденфроста реализуются известные гидродинамические режимы: «осаждение капли» – «танец» – «отскок» – «термическое распыление». При взаимодействии капли с LIS поверхностями реализуются гидродинамические режимы «осаждение капли» – «вторичное распыление». За счет наличия тонкого слоя смазки на LIS-поверхностях не реализуются гидродинамические режимы «танец» и «отскок», а распад «родительской капли» осуществляется по механизму «вторичного распыления».

1.2. Установлены температуры нагрева поверхностей, способствующие наиболее интенсивному «термическому распылению» и «вторичному распылению» капель воды объемом 5 мкл на полированной поверхности, поверхностях с развитой текстурой и экстремальными свойствами смачивания, а также на LIS. При реализации «термического распыления» размер формирующихся вторичных капель зависит от шероховатости поверхности и не зависит от свойств смачивания. Чем выше шероховатость поверхности, тем размер вторичных капель меньше. На поверхностях с экстремальными свойствами смачивания наибольшие размеры вторичных капель 0,5 мм, также как и на полированной поверхности, зарегистрированы при температуре 140 °С. При более высоких температурах поверхностей с экстремальными свойствами смачивания размеры вторичных капель уменьшаются.

1.3. На LIS размеры вторичных капель при «вторичном» распылении больше, чем на существенно шероховатых поверхностях с экстремальными свойствами смачивания при «термическом распылении», но меньше, чем на полированной поверхности. Слой смазки на LIS формирует поверхность,

близкую по характеристикам шероховатости к идеально гладкой. При этом размеры вторичных капель при диспергировании «родительской капли» меньше, чем на полированной, которая не является идеально гладкой поверхностью. Причинами формирования вторичных капель при реализации «вторичного распыления» и «термического распыления» является разрушение паровых пузырей.

1.4. Чем лучше свойства смачиваемости, тем время задержки распада «родительской капли» меньше по механизму «термического» распыления. Это обусловлено тем, что площадь растекания капли воды на поверхностях с лучшими свойствами смачивания больше, следовательно, высота капли меньше и времена прогрева капли до условий «термического» распыления уменьшаются.

1.5. От свойств смазки зависит время задержки до реализации распада «родительской капли» по механизму «вторичного распыления», а от свойств смачивания основы LIS не зависят.

1.6. Сформулирована гипотеза о механизме реализации «вторичного» распыления капель полярных теплоносителей (в том числе воды) на LIS. Суть гипотезы состоит в том, что «вторичное» распыление капель на LIS реализуется только при условии, что в поверхностном натяжении капли теплоносителя, взаимодействующей с LIS, преобладает полярная составляющая (теплоноситель должен быть полярной жидкостью $\gamma^{AB}/\gamma^{LW} > 1,0$), а в поверхностном натяжении смазки должно преобладать дисперсионная составляющая (смазка должна быть дисперсионной жидкостью $\gamma^{LW}/\gamma^{AB} \leq 0,1$). То есть «вторичное» распыление капель на LIS реализуется только при условии взаимной нерастворимости теплоносителя и смазки (лубриканта).

1.7. По результатам анализа «эффекта охлаждения» на исследуемых поверхностях можно заключить следующее. В диапазоне температур нагрева до 160 °С наиболее предпочтительными с точки зрения практического применения являются супергидрофильные поверхности, позволяющие

наиболее эффективно реализовать теплоотвод при капельном охлаждении по механизму «термического» распыления. Супергидрофобные поверхности целесообразно использовать в диапазоне высоких температур от 180 °С до 240 °С, так как их охлаждение каплями воды более существенно по механизму «термического» распыления. LIS-поверхности, на которых реализуется механизм «вторичного» распыления, имеют наихудшие характеристики охлаждения из исследуемых поверхностей, несмотря на то, что кризис теплообмена на этих поверхностях реализуется при более высоких температурах нагрева, чем на полированных поверхностях. Поэтому их использование для систем охлаждения нецелесообразно.

2.1. Проведено исследование механизмов теплообмена при испарении капли воды объемом 5 мкл, расположенной на модифицированных поверхностях из алюминиевого сплава АМГ-3 с контрастным смачиванием, в широком диапазоне температур от 80 °С до 300 °С. Проанализирована эволюция теплоотвода при переходе от конвективного испарения к кризису теплообмена – эффекту Лейденфроста.

2.2. На базе комбинации методов обработки поверхностей металлов лазерным излучением наносекундной длительности и гидрофобизации путем пришивки к текстурированной поверхности алкильных $-CH_2-$ и $-CH_3-$ групп, содержащихся в продуктах термоллиза масла, разработан новый подход к созданию поверхностей теплообмена с контрастным смачиванием (сочетанием супергидрофильных/супергидрофобных зон). По результатам анализа методами сканирующей электронной микроскопии и профилометрии доказано, что на созданных поверхностях теплообмена с контрастным смачиванием достигнута однородность текстуры в виде многомодальной шероховатости при локальном изменении смачиваемости. Последнее позволило получить экспериментальные данные о влиянии смачиваемости как независимого фактора на характеристики испарения капли, что невозможно при использовании традиционных подходов к созданию бифильных поверхностей.

2.3. В условиях испарения капли воды, расположенной на поверхностях с контрастным смачиванием, при температурах нагрева 80 °С показано, что недостаточно применять только интегральный критерий эффективности охлаждения – скорость испарения капли. Важно учитывать локальную эффективность теплоотвода. Показано, что более быстрое испарение капли не всегда означает лучшее охлаждение. Неочевидный на первый взгляд результат объясняется тем, что широко применяемый подход, связывающий эффективность охлаждения исключительно со скоростью испарения с поверхности раздела «жидкость – окружающая среда», является упрощенным. Он не учитывает особенностей процесса теплообмена на бифильных поверхностях, формирование специфичных паттернов течения внутри капли, интенсификацию конвективного переноса массы и теплоотвода вблизи линии трехфазного контакта, а также изменение механизма теплопередачи благодаря синергетическому эффекту от взаимодействия гидрофильных и гидрофобных зон. Хотя скорость фазового перехода на бифильных поверхностях ниже, чем на полированной поверхности, локальная эффективность теплоотвода в области контакта капли с нагретой поверхностью оказывается выше. Это приводит к более значительному снижению температуры поверхности в зоне непосредственного контакта капли теплоносителя. Средние скорости конвективных потоков на поверхностях с супергидрофобными/ супергидрофильными свойствами превышают аналогичные показатели для полированных в 3–10 раз. Эта интенсифицированная внутренняя циркуляция является фактором, обеспечивающим эффективный перенос теплоты от нагретой поверхности к зонам испарения на линии трехфазного контакта.

2.4. Увеличение степени гидрофобизации бифильных поверхностей, то есть рост доли площади с супергидрофобными свойствами относительно супергидрофильной зоны, приводит к снижению скорости испарения капли при температуре 80 °С. При степени гидрофобизации 54 %, когда соотношение площадей с супергидрофобными и супергидрофильными

свойствами составляет 54:46, характеристики испарения капли воды схожи с характеристиками, наблюдаемыми на полностью супергидрофобной поверхности. При уменьшении доли гидрофобной зоны в 3,3 раза (с 53,8 % до 16,1 %), скорость испарения возрастает в 2,8 раза. Последнее подтверждает зависимость скорости испарения от соотношения площадей гидрофильных/гидрофобных зон. Оптимальное соотношение супергидрофобных и супергидрофильных зон на поверхности составляет 30–45 %, при котором достигается наибольшее охлаждение за счет синергетического эффекта между увеличением длины линии трехфазного контакта и развитием интенсивной термокапиллярной конвекции. Поверхности с комбинацией супергидрофобных и супергидрофильных зон характеризуются лучшими показателями по снижению температуры, превосходя полированную поверхность на 11–81 % в области температур от 80 °С до 140 °С, на 11–90 % в области от 140 °С до 190 °С и на 63–88 % в области от 190 °С до 285 °С.

Поверхности с комбинацией гидрофильных и супергидрофильных свойств демонстрируют наиболее интенсивное охлаждение за счет испарения, капли воды по сравнению с другими исследуемыми образцами. Это превосходство объясняется не только комбинацией супергидрофильных и гидрофильных свойств, но и значительно большей шероховатостью. Из-за развитой шероховатости площадь поверхностей с комбинацией гидрофильных и супергидрофильных свойств примерно в 7 раз (параметр $S_{dr} \approx 700 \%$) превышает площадь полированной поверхности раз (параметр $S_{dr} \approx 3,7 \%$). Для сравнения, у поверхностей с супергидрофобными/супергидрофильными свойствами шероховатость увеличивает площадь лишь в 6 раз (параметр $S_{dr} \approx 600 \%$), что и обуславливает разницу в эффективности охлаждения.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В диссертационной работе решена актуальная научно-техническая задача повышения интенсивности теплоотвода от поверхности теплообмена при испарении капель теплоносителя. Цель работы достигнута за счет разработки и реализации подходов к формированию развитой многомодальной шероховатости и пространственного распределения зон с контрастной смачиваемостью поверхности, обеспечивающих интенсификацию теплоотвода в широком диапазоне температур. Основные научные и практические результаты, соответствующие защищаемым положениям, заключаются в следующем:

1. Установлены и сопоставлены механизмы и эффективность теплоотвода при «термическом» и «вторичном» распылении капель воды. Экспериментально показано, что «термическое» распыление на структурированных поверхностях с экстремальной смачиваемостью (супергидрофильной и супергидрофобной) обеспечивает более эффективное охлаждение приповерхностного слоя по сравнению с «вторичным» распылением на LIS-поверхностях. На супергидрофильной поверхности при 140 °С зарегистрировано снижение температуры на 32,5 °С, на супергидрофобной при 180 °С – на 22 °С, тогда как на LIS при 160 °С эффект не превышает 8–12 °С. Для последних выявлено, что «вторичное» распыление реализуется только при условии преобладания полярной составляющей в поверхностном натяжении теплоносителя и дисперсионной – в смазке, то есть при их взаимной нерастворимости.

2. Разработан и экспериментально реализован подход независимого контроля шероховатости и смачиваемости поверхностей. На основе последовательного применения лазерной абляции, термолиза углеводородсодержащих жидкостей и локального лазерного нагрева созданы принципиально новые типы бифильных структурированных поверхностей. Доказана однородность многомодальной шероховатости при локальном

изменении смачиваемости, что позволило впервые разделить вклад этих факторов в процессы тепло- и массообмена при испарении теплоносителя.

3. Доказано, что удельная скорость испарения не является однозначным критерием эффективности теплоотвода. Для поверхностей с контрастным смачиванием (бифильных) установлено, что снижение интегральной скорости испарения на 29–74 % компенсируется локальной интенсификацией теплообмена. При температуре 80 °С поверхности теплообмена (бифильная поверхность с соотношением супергидрофобных и супергидрофильных зон 30–45 %) снижение температуры в ее приповерхностном слое достигает 3,0–3,2 °С, что более чем в шесть раз превышает показатель для полированной поверхности (0,5 °С). Интенсификация обусловлена увеличением протяженности линии трехфазного контакта (до 22,5 мм против 8,8 мм) и многократным (в 3–10 раз) усилением термокапиллярной конвекции.

4. Определены оптимальные соотношения площадей зон с контрастной смачиваемостью и температурные диапазоны эффективной работы разработанных структурированных поверхностей. Наиболее интенсивный теплоотвод на бифильных поверхностях с комбинацией супергидрофобных и супергидрофильных зон достигается при степени гидрофобизации 30–45 %, что обеспечивает превосходство над полированной поверхностью на 11–90 % в диапазоне температур 80–190 °С и на 63–88 % в диапазоне 190–285 °С. Поверхности с комбинацией гидрофильных и супергидрофильных зон (Phi-серия), характеризующиеся семикратным увеличением площади ($S_{dr} \approx 700\%$), обеспечивают до 20-ти кратного повышения эффективности охлаждения при температурах до 200 °С. Супергидрофобные поверхности и бифильные поверхности с экстремальным контрастом расширяют рабочий диапазон эффективного охлаждения до 180–260 °С, превосходя полированные аналоги до 6 раз.

Совокупность полученных результатов представляет собой научно-обоснованные технические решения для создания высокоэффективных

систем охлаждения теплонагруженного оборудования микроэлектроники и энергетики. Разработанные принципы структурирования поверхностей позволяют прогнозируемо управлять режимами испарения и интенсивностью теплоотвода.

Автор выражает искреннюю благодарность и глубокую признательность кандидату технических наук, доценту Исследовательской школы физики высокоэнергетических процессов Национального исследовательского Томского политехнического университета Феоктистову Дмитрию Владимировичу за неоценимый вклад в выполнение настоящей диссертационной работы.

Особая признательность адресована за:

– разработку и внедрение оригинальных методик экспериментальных исследований, включая подходы к созданию структурированных поверхностей, а также методологию комбинации методов PIV и PLIF с высокоточной локальной термометрией;

– непосредственное участие в анализе и интерпретации экспериментальных данных, позволившее установить новые фундаментальные закономерности теплообмена при испарении капель на структурированных поверхностях;

– обсуждение результатов и формулирование научных положений, выносимых на защиту, что способствовало обоснованию выводов.

Научно-методические подходы, предложенные и реализованные при непосредственном участии Феоктистова Д.В., составили основу экспериментальной базы диссертации и определили направление дальнейших исследований в области интенсификации теплообмена на структурированных поверхностях. Представленные в работе результаты, полученные при его участии, имеют самостоятельную научную ценность и служат основой для последующих исследований.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Feoktistov, D.V. Increasing the energy efficiency of cooling systems for energy-saturated equipment by shifting the second kind heat transfer crisis to the higher temperature region / D.V. Feoktistov, G.V. Kuznetsov, A. Abedtazehabadi, E.G. Orlova, S.P. Bondarchuk, A.V. Dorozhkin // *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University, Geo Assets Engineering*. – 2023. – Vol. 334, No. 4. – P. 72–88.
2. Singh, H. Thermal management of high flux electronics using film evaporation with an enhanced fluid delivery system (FEEDS) / H. Singh, R. Mandel, A. Sarmiento, M. Ohadi // *International Communications in Heat and Mass Transfer*. – 2023. – Vol. 148. – Article number 107008.
3. Tran, T. Droplet impact on superheated micro-structured surfaces / T. Tran, H.J.J. Staat, A. Susarrey-Arce, T.C. Foertsch, A. Van Houselt, H.J.G.E. Gardeniers, A. Prosperetti, D. Lohse, C. Sun // *Soft Matter*. – 2013. – Vol. 9, No. 12. – P. 3272–3282.
4. Clavijo, C.E. Hydrodynamics of droplet impingement on hot surfaces of varying wettability / C.E. Clavijo, J. Crockett, D. Maynes // *International Journal of Heat and Mass Transfer*. – 2017. – Vol. 108. – P. 1714–1726.
5. Moita, A.S. Drop impacts onto cold and heated rigid surfaces: Morphological comparisons, disintegration limits and secondary atomization / A.S. Moita, A.L.N. Moreira // *International Journal of Heat and Fluid Flow*. – 2007. – Vol. 28, No. 4. – P. 735–752.
6. Schmidt, J.B. Modelling of drop and spray impact in the transitional boiling regime / J.B. Schmidt, F. Tenzer, C. Tropea, J. Hussong, I.V. Roisman // *International Journal of Heat and Mass Transfer*. – 2023. – Vol. 217. – Article number 124586.
7. Lee, S.-H. Drop impact on hot plates: contact times, lift-off and the lamella rupture / S.-H. Lee, K. Harth, M. Rump, M. Kim, D. Lohse, K. Fezzaa, J.H. Je // *Soft Matter*. – 2020. – Vol. 16, No. 34. – P. 7935–7949.

8. Yang, H. A spontaneous Leidenfrost transitioning phenomenon / H. Yang, T.M. Thomas, P. Valluri, K. Sefiane // *Applied Physics Letters*. – 2025. – Vol. 127, No. 23. – Article number 232703.
9. Xu, R. Spray Cooling on Enhanced Surfaces: A Review of the Progress and Mechanisms / R. Xu, G. Wang, P. Jiang // *Journal of Electronic Packaging*. – 2022. – Vol. 144, No. 1. – Article number 010802.
10. Yin, J. Spray Cooling as a High-Efficient Thermal Management Solution: A Review / J. Yin, S. Wang, X. Sang, Z. Zhou, B. Chen, P. Thrassos, A. Romeos, A. Giannadakis // *Energies*. – 2022. – Vol. 15, No. 22. – Article number 8547.
11. Wakata, Y. How roughness and thermal properties of a solid substrate determine the Leidenfrost temperature: Experiments and a model / Y. Wakata, N. Zhu, X. Chen, S. Lyu, D. Lohse, X. Chao, C. Sun // *Physical Review Fluids*. – 2023. – Vol. 8, No. 6. – Article number L061601.
12. Gatapova, E.Y. Evaporation of a sessile water drop on a heated surface with controlled wettability / E.Y. Gatapova, A.A. Semenov, D.V. Zaitsev, O.A. Kabov // *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*. – 2014. – Vol. 441. – P. 776–785.
13. Cheng, H.C. Ring droplet formation during evaporation of a sessile water droplet on a biphilic surface / H.C. Cheng, C.H. Li, T.L. Chang, P.H. Chen // *International Journal of Heat and Mass Transfer*. – 2022. – Vol. 182, No. 12. – Article number 121956.
14. Ren, C. Flow boiling in microchannels enhanced by parallel microgrooves fabricated on the bottom surfaces / C. Ren, W. Li, J. Ma, G. Huang, C. Li // *International Journal of Heat and Mass Transfer*. – 2021. – Vol. 166. – Article number 120756.
15. Jun, S. Enhancement of Pool Boiling Heat Transfer in Water Using Sintered Copper Microporous Coatings / S. Jun, J. Kim, D. Son, H.Y. Kim, S.M. You // *Nuclear Engineering and Technology*. – 2016. – Vol. 48, No. 4. – P. 932–940.

16. Yang, F. Flow boiling phenomena in a single annular flow regime in microchannels (II): Reduced pressure drop and enhanced critical heat flux / F. Yang, X. Dai, Y. Peles, P. Cheng, J. Khan, C. Li // *International Journal of Heat and Mass Transfer*. – 2014. – Vol. 68. – P. 716–724.
17. Zhu, Y. Surface Structure Enhanced Microchannel Flow Boiling / Y. Zhu, D.S. Antao, K.-H. Chu, S. Chen, T.J. Hendricks, T. Zhang, E.N. Wang // *Journal of Heat Transfer*. – 2016. – Vol. 138, No. 9. – Article number 091501.
18. Betz, A.R. Boiling heat transfer on superhydrophilic, superhydrophobic, and superbiphilic surfaces / A.R. Betz, J. Jenkins, C.J. Kim, D. Attinger // *International Journal of Heat and Mass Transfer*. – 2013. – Vol. 57, No. 2. – P. 733–741.
19. Yang, Y. Transport dynamics of droplet impact on the wedge-patterned biphilic surface / Y. Yang, Z. Wu, X. Chen, Y. Huang, B. Wu, P. Falkman, B. Sundén // *Experimental Thermal and Fluid Science*. – 2020. – Vol. 113, No. 9. – Article number 110020.
20. Widom, B. Capillarity and Wetting Phenomena: Drops, Bubbles, Pearls, Waves / B. Widom // *Physics Today*. – 2004. – Vol. 57, No. 12. – P. 66–67.
21. Feoktistov, D.V. Heat-transfer enhancement and evaporation mechanisms on roughness-controlled wettability-contrast surfaces / D.V. Feoktistov, E.G. Orlova, E.Y. Laga, D.M. Klepikov, K.K. Paushkina, A.O. Pleshko, D.O. Glushkov // *International Journal of Heat and Mass Transfer*. – 2026. – Vol. 260. – Article number 128413.
22. Wong, T.-S. Bioinspired self-repairing slippery surfaces with pressure-stable omniphobicity / T.-S. Wong, S.H. Kang, S.K.Y. Tang, E.J. Smythe, B.D. Hatton, A. Grinthal, J. Aizenberg // *Nature*. – 2011. – Vol. 477, No. 7365. – P. 443–447.
23. Boinovich, L.B. Effect of Water Adsorption on Lubricating Film Stability in Slippery Coatings / L.B. Boinovich, A.M. Emelyanenko, K.A. Emelyanenko // *Langmuir*. – 2024. – Vol. 40, No. 3. – P. 1633–1645.
24. Peppou-Chapman, S. Life and death of liquid-infused surfaces: a

review on the choice, analysis and fate of the infused liquid layer / S. Peppou-Chapman, J.K. Hong, A. Waterhouse, C. Neto // *Chemical Society Reviews*. – 2020. – Vol. 49, No. 11. – P. 3688–3715.

25. Kolle, S. Synergistic Benefits of Micro/Nanostructured Oil-Impregnated Surfaces in Reducing Fouling while Enhancing Heat Transfer / S. Kolle, A. Davitt, Y. Zhou, J. Aizenberg, S. Adera // *Langmuir*. – 2023. – Vol. 39, No. 19. – P. 6705–6712.

26. Feoktistov, D.V. Thermal and secondary splashing of water droplets on heat transfer surfaces / D.V. Feoktistov, D.M. Klepikov, D.O. Glushkov // *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University Geo Assets Engineering*. – 2026. – Vol. 337, No. 1. – P. 178–192.

27. Lafuma, A. Slippery pre-suffused surfaces / A. Lafuma, D. Quéré // *EPL (Europhysics Letters)*. – 2011. – Vol. 96, No. 5. – Article number 56001.

28. He, Z. Design, fabrication, and applications of bioinspired slippery surfaces / Z. He, L. Mu, N. Wang, J. Su, Z. Wang, M. Luo, C. Zhang, G. Li, X. Lan // *Advances in Colloid and Interface Science*. – 2023. – Vol. 318. – Article number 102948.

29. Tripathi, D. Durability of Slippery Liquid-Infused Surfaces: Challenges and Advances / D. Tripathi, P. Ray, A.V. Singh, V. Kishore, S.L. Singh // *Coatings*. – 2023. – Vol. 13, No. 6. – Article number 1095.

30. Gresham, I.J. Advances and challenges in slippery covalently-attached liquid surfaces / I.J. Gresham, C. Neto // *Advances in Colloid and Interface Science*. – 2023. – Vol. 315. – Article number 102906.

31. Kuznetsov, G.V. Unification of the textures formed on aluminum after laser treatment / G.V. Kuznetsov, D.V. Feoktistov, E.G. Orlova, K. Batishcheva, S. Ilenok // *Applied Surface Science*. – 2019. – Vol. 469. – P. 974–982.

32. Feoktistov, D.V. The effect of ceramic surface structure modification method on the ignition and combustion behavior of non-metallized and metallized gel fuel particles exposed to conductive heating / D.V. Feoktistov, D.O. Glushkov, A.G. Nigay, D.S. Nikitin, E.G. Orlova, I.I. Shanenkov // *Fuel*. – 2022. –

Vol. 330. – Article number 125576.

33. Charpentier, T.V.J. Liquid infused porous surfaces for mineral fouling mitigation / T.V.J. Charpentier, A. Neville, S. Baudin, M.J. Smith, M. Euvrard, A. Bell, C. Wang, R. Barker // *Journal of Colloid and Interface Science*. – 2015. – Vol. 444. – P. 81–86.

34. Xiao, R. Immersion Condensation on Oil-Infused Heterogeneous Surfaces for Enhanced Heat Transfer / R. Xiao, N. Miljkovic, R. Enright, E.N. Wang // *Scientific Reports*. – 2013. – Vol. 3, No. 1. – Article number 1988.

35. Anand, S. Enhanced condensation on lubricant-impregnated nanotextured surfaces / S. Anand, A.T. Paxson, R. Dhiman, J.D. Smith, K.K. Varanasi // *ACS Nano*. – 2012. – Vol. 6, No. 11. – P. 10122–10129.

36. Sett, S. Lubricant-Infused Surfaces for Low-Surface-Tension Fluids: Promise versus Reality / S. Sett, X. Yan, G. Barac, L.W. Bolton, N. Miljkovic // *ACS Applied Materials & Interfaces*. – 2017. – Vol. 9, No. 41. – P. 36400–36408.

37. Weisensee, P.B. Condensate droplet size distribution on lubricant-infused surfaces / P.B. Weisensee, Y. Wang, H. Qiang, D. Schultz, W.P. King, N. Miljkovic // *International Journal of Heat and Mass Transfer*. – 2017. – Vol. 109. – P. 187–199.

38. Preston, D.J. Design of Lubricant Infused Surfaces / D.J. Preston, Y. Song, Z. Lu, D.S. Antao, E.N. Wang // *ACS Applied Materials and Interfaces*. – 2017. – Vol. 9, No. 48. – P. 42383–42392.

39. Pavón-Moreno, M.C. Critical Assessment of Migration Strategies for Corrosion in Molten Salts / M.C. Pavón-Moreno, A. Lopez-Paneque, J.M. Gallardo, A. Paul, E. Díaz-Gutierrez, C. Prieto // *Materials*. – 2025. – Vol. 18, No. 16. – Article number 3804.

40. Starinskaya, E. Evaporation Dynamics of Sessile and Suspended Almost-Spherical Droplets from a Biphilic Surface / E. Starinskaya, N. Miskiv, V. Terekhov, A. Safonov, Y. Li, M.-K. Lei, S. Starinskiy // *Water*. – 2023. – Vol. 15, No. 2. – Article number 273.

41. Malakhov, I.P. Heat transfer enhancement and increase in critical heat

flux during boiling on a biphilic silicon surface / I.P. Malakhov, V.S. Serdyukov, A.I. Safonov, A.A. Rodionov, S.V. Starinskiy, A.S. Surtaev // *Thermophysics and Aeromechanics*. – 2024. – Vol. 31, No. 1. – P. 189–192.

42. Feoktistov, D.V. Biphilic heat exchange surfaces for drip irrigation cooling systems / D.V. Feoktistov, A. Abedtazehabadi, A.V. Dorozhkin, E.Y. Laga, A.O. Pleshko, E.G. Orlova // *International Journal of Heat and Mass Transfer*. – 2024. – Vol. 224. – Article number 125316.

43. Xiang, L. A comprehensive review of boiling heat transfer characteristics of wettability patterned surface / L. Xiang, Y. Song, D. Yang, X. Yang, K. Vafai // *Experimental Thermal and Fluid Science*. – 2024. – Vol. 154. – Article number 111145.

44. Kabov, O.A. Experimental and numerical studies of evaporation of a sessile water drop on a heated conductive substrate / O.A. Kabov, E.Y. Gatapova, A.A. Semenov, M.S. Jutley, V.V. Ajaev, E.O. Kirichenko, D.V. Feoktistov, G.V. Kuznetsov, D.V. Zaitsev // *Interfacial Phenomena and Heat Transfer*. – 2018. – Vol. 6, No. 4. – P. 421–435.

45. Dash, S. Droplet evaporation on heated hydrophobic and superhydrophobic surfaces / S. Dash, S.V. Garimella // *Physical Review E*. – 2014. – Vol. 89, No. 4. – Article number 042402.

46. Starinskaya, E.M. Formation of uniform spatial distribution of Fe₃O₄ nanoparticles during evaporation of a magnetic nanofluid droplet on a biphilic surface / E.M. Starinskaya, A.A. Rodionov, A.I. Safonov, V.S. Sulyaeva, N.B. Miskiv, S.V. Starinskiy // *International Journal of Heat and Mass Transfer*. – 2025. – Vol. 239. – Article number 126602.

47. Alizadeh-Birjandi, E. Condensation on Surfaces With Biphilic Topography: Experiment and Modeling / E. Alizadeh-Birjandi, A. Alshehri, H.P. Kavehpour // *Frontiers in Mechanical Engineering*. – 2019. – Vol. 5. – Article number 445330.

48. Kong, Z. Mechanism of droplet rebound failure induced by temperature difference-driven condensation on superhydrophobic surfaces /

Z. Kong, Z. Yan, Y. Tang, Z. Ou, K. Zhang, X. Lv, W. Yuan, Y. He // *Applied Thermal Engineering*. – 2025. – Vol. 279. – Article number 128131.

49. Yang, Y. Influence of hydrophobic area fraction of a wettability-patterned evaporator in an ultrathin vapor chamber / Y. Yang, J. Li, X. Ye, H. Qiu // *International Journal of Heat and Mass Transfer*. – 2022. – Vol. 198. – Article number 123414.

50. Somwanshi, P.M. Understanding vertical coalescence dynamics of liquid drops over a superhydrophobic surface using high-speed orthographic visualization / P.M. Somwanshi, V.V. Cheverda, K. Muralidhar, S. Khandekar, O.A. Kabov // *Experiments in Fluids*. – 2022. – Vol. 63, No. 2. – Article number 47.

51. Li, Q. Droplet migration on hydrophobic–hydrophilic hybrid surfaces: a lattice Boltzmann study / Q. Li, Y. Yu, P. Zhou, H.J. Yan // *RSC Advances*. – 2017. – Vol. 7, No. 24. – P. 14701–14708.

52. Varagnolo, S. Stick-Slip Sliding of Water Drops on Chemically Heterogeneous Surfaces / S. Varagnolo, D. Ferraro, P. Fantinel, M. Pierno, G. Mistura, G. Amati, L. Biferale, M. Sbragaglia // *Physical Review Letters*. – 2013. – Vol. 111, No. 6. – Article number 066101.

53. Yada, S. Droplet Impact on Asymmetric Hydrophobic Microstructures / S. Yada, U. Lacis, W. Van Der Wijngaart, F. Lundell, G. Amberg, S. Bagheri // *Langmuir*. – 2022. – Vol. 38, No. 26. – P. 7956–7964.

54. Erkan, N. Full-field spreading velocity measurement inside droplets impinging on a dry solid-heated surface / N. Erkan // *Experiments in Fluids*. – 2019. – Vol. 60, No. 5. – P. 1–17.

55. Fabien, G. Use of IR Thermography To Investigate Heated Droplet Evaporation and Contact Line Dynamics / G. Fabien, M. Antoni, K. Sefiane // *Langmuir*. – 2011. – Vol. 27, No. 11. – P. 6744–6752.

56. Kavuri, S. Evaporation of Sessile Drops on a Heated Superhydrophobic Substrate / S. Kavuri, C.S. Sharma, G. Karapetsas, K.C. Sahu // *Langmuir*. – 2025. – Vol. 41, No. 34. – P. 23003–23014.

57. Pontes, P. Bubble Dynamics and Heat Transfer on Biphilic Surfaces: Experiments and Numerical Simulation / P. Pontes, R. Cautela, E. Teodori, A.S. Moita, A. Georgoulas, A.L.N.M. Moreira // *Journal of Bionic Engineering*. – 2020. – Vol. 17, No. 4. – P. 809–821.
58. Qi, W. Evaporation of Sessile Water Droplets on Horizontal and Vertical Biphibic Patterned Surfaces / W. Qi, J. Li, P.B. Weisensee // *Langmuir*. – 2019. – Vol. 35, No. 52. – P. 17185–17192.
59. Parisi, G. A Dynamically Responsive Surface with Switchable Wettability for Efficient Evaporation and Self-Cleaning Abilities / G. Parisi, A. Lopez, S. Narayan // *ACS Applied Engineering Materials*. – 2022. – Vol. 1, No. 1. – P. 408–416.
60. Ma, Q. Droplet boiling on heated surfaces with various wettabilities / Q. Ma, X. Wu, T. Li, F. Chu // *Applied Thermal Engineering*. – 2020. – Vol. 167. – Article number 114703.
61. Semenov, A.A. Effect of coatings with vertically and horizontally oriented carbon nanotubes on evaporation of water droplets / A.A. Semenov, D.V. Zaitsev, O.A. Kabov // *Interfacial Phenomena and Heat Transfer*. – 2021. – Vol. 9, No. 1. – P. 87–96.
62. Nakoryakov, V.E. The behavior of water droplets on the heated surface / V.E. Nakoryakov, S.Y. Misyura, S.L. Elistratov // *International Journal of Heat and Mass Transfer*. – 2012. – Vol. 55, No. 23–24. – P. 6609–6617.
63. Askounis, A. Influence of Local Heating on Marangoni Flows and Evaporation Kinetics of Pure Water Drops / A. Askounis, Y. Kita, M. Kohno, Y. Takata, V. Koutsos, K. Sefiane // *Langmuir: the ACS journal of surfaces and colloids*. – 2017. – Vol. 33, No. 23. – P. 5666–5674.
64. Zhang, Z. Effect of Photoresist Biomimetic Surface Roughness on Droplet Evaporation Dynamics / Z. Zhang, X. Gao, Y. Yan // *Journal of Bionic Engineering*. – 2025. – Vol. 22, No. 3. – P. 1338–1351.
65. Tran, N.G. Green manufacturing of extreme wettability contrast surfaces with superhydrophilic and superhydrophobic patterns on aluminum /

N.G. Tran, D.M. Chun // *Journal of Materials Processing Technology*. – 2021. – Vol. 297. – Article number 117245.

66. Vasiliev, M.M. Why do metals become superhydrophilic during nanosecond laser processing? Design of superhydrophilic, anisotropic and biphilic surfaces / M.M. Vasiliev, Y.G. Shukhov, A.A. Rodionov, V.S. Sulyaeva, D.M. Markovich, S.V. Starinskiy // *Applied Surface Science*. – 2024. – Vol. 653. – Article number 159392.

67. Feoktistov, D.V. Expanding the scope of SiC ceramics through its surface modification by different methods / D.V. Feoktistov, G.V. Kuznetsov, A.A. Sivkov, A.S. Ivashutenko, D.S. Nikitin, I.I. Shanenkov, A.M. Abdelmagid, E.G. Orlova // *Surface and Coatings Technology*. – 2022. – Vol. 435. – Article number 128263.

68. Misyura, S.Y. Wetting, droplet evaporation and corrosion behavior of various composite and textured materials / S.Y. Misyura, V.S. Morozov, E.G. Orlova, V.A. Andryushchenko // *Ceramics International*. – 2024. – Vol. 50, No. 11. – P. 19269–19282.

69. Zupančič, M. Enhanced pool-boiling heat transfer on laser-made hydrophobic/superhydrophilic polydimethylsiloxane-silica patterned surfaces / M. Zupančič, M. Steinbücher, P. Gregorčič, I. Golobič // *Applied Thermal Engineering*. – 2015. – Vol. 91. – P. 288–297.

70. Kruse, C.M. Enhanced pool-boiling heat transfer and critical heat flux on femtosecond laser processed stainless steel surfaces / C.M. Kruse, T. Anderson, C. Wilson, C. Zuhlke, D. Alexander, G. Gogos, S. Ndao // *International Journal of Heat and Mass Transfer*. – 2015. – Vol. 82. – P. 109–116.

71. Ho, J.Y. Saturated pool boiling of FC-72 from enhanced surfaces produced by Selective Laser Melting / J.Y. Ho, K.K. Wong, K.C. Leong // *International Journal of Heat and Mass Transfer*. – 2016. – Vol. 99. – P. 107–121.

72. Liu, B. Experimental and theoretical study of pool boiling heat transfer and its CHF mechanism on femtosecond laser processed surfaces / B. Liu, J. Liu, Y. Zhang, J. Wei, W. Wang // *International Journal of Heat and Mass*

Transfer. – 2019. – Vol. 132. – P. 259–270.

73. Voglar, J. Boiling performance on surfaces with capillary-length-spaced one- and two-dimensional laser-textured patterns / J. Voglar, P. Gregorčič, M. Zupančič, I. Golobič // *International Journal of Heat and Mass Transfer.* – 2018. – Vol. 127. – P. 1188–1196.

74. Gregorčič, P. Scalable Surface Microstructuring by a Fiber Laser for Controlled Nucleate Boiling Performance of High- and Low-Surface-Tension Fluids / P. Gregorčič, M. Zupančič, I. Golobič // *Scientific Reports.* – 2018. – Vol. 8, No. 1. – P. 1–8.

75. Može, M. Surface chemistry and morphology transition induced by critical heat flux incipience on laser-textured copper surfaces / M. Može, M. Zupančič, M. Hočevar, I. Golobič, P. Gregorčič // *Applied Surface Science.* – 2019. – Vol. 490, No. June. – P. 220–230.

76. Mani, D. Investigation to Improve the Pool Boiling Heat Transfer Characteristics Using Laser-Textured Copper-Grooved Surfaces / D. Mani, S. Sivan, H.M. Ali, U.K. Ganesan // *International Journal of Photoenergy.* – 2020. – Vol. 2020. – P. 1–8.

77. Sbragaglia, M. Sliding drops across alternating hydrophobic and hydrophilic stripes / M. Sbragaglia, L. Biferale, G. Amati, S. Varagnolo, D. Ferraro, G. Mistura, M. Pierno // *Physical Review E.* – 2014. – Vol. 89, No. 1. – Article number 012406.

78. Misyura, S.Y. The influence of the surface microtexture on wettability properties and drop evaporation / S.Y. Misyura, G.V. Kuznetsov, D.V. Feoktistov, R.S. Volkov, V.S. Morozov, E.G. Orlova // *Surface and Coatings Technology.* – 2019. – Vol. 375. – P. 458–467.

79. Starinskaya, E.M. Evaporation of droplets on inclined biphilic surfaces / E.M. Starinskaya, N.B. Miskiv, A.A. Rodionov, N.A. Nazarov, A.M. Kargina, S.V. Starinskiy, V.V. Terekhov, S. Tonini, P. Conti, G.E. Cossali, S.S. Sazhin // *International Journal of Heat and Mass Transfer.* – 2026. – Vol. 256. – P. 127978–127978.

80. Pontes, P. Bubble Dynamics and Heat Transfer on Biphilic Surfaces / *Advances in Heat Transfer and Thermal Engineering*. – 2021. – P. 93–97.
81. Pontes, P. Experimental description of bubble dynamics and heat transfer processes occurring on the pool boiling of water on biphilic surfaces / P. Pontes, R. Cautela, E. Teodori, A.S. Moita, A.L.N. Moreira // *Applied Thermal Engineering*. – 2020. – Vol. 178. – Article number 115507.
82. Daniel, S. Fast drop movements resulting from the phase change on a gradient surface / S. Daniel, M.K. Chaudhury, J.C. Chen // *Science* (New York, N.Y.). – 2001. – Vol. 291, No. 5504. – P. 633–636.
83. Kita, Y. Thermal hysteresis in wettability and the Leidenfrost phenomenon / Y. Kita, K. Kida, T. Ariyoshi, S. Hidaka, M. Kohno, Y. Takata // *Physical Review Research*. – 2024. – Vol. 6, No. 3. – Article number 033287.
84. Lin, Y. Wetting dynamics and heat transfer of droplet evaporation around boiling point: Facile manipulation by surface roughness / Y. Lin, X. Wu, Y. Wei, F. Chu // *Applied Thermal Engineering*. – 2025. – Vol. 258. – Article number 124851.
85. Ogata, S. Effect of Surface Textures and Wettability on Droplet Impact on a Heated Surface / S. Ogata, R. Nakanishi // *Processes*. – 2021. – Vol. 9, No. 2. – Article number 350.
86. Jiao, Y. Effect of the Surface Peak-Valley Features on Droplet Impact Dynamics under Leidenfrost Temperature / Y. Jiao, J. Wang, Y. Guo, Y. Du, Y. Zhu, J. Ji, X. Liu, K. Liu // *Langmuir*. – 2024. – Vol. 40, No. 39. – P. 20773–20782.
87. Van Limbeek, M.A.J. Origin of spray formation during impact on heated surfaces / M.A.J. Van Limbeek, P.B.J. Hoefnagels, C. Sun, D. Lohse // *Soft Matter*. – 2017. – Vol. 13, No. 41. – P. 7514–7520.
88. Guildenbecher, D.R. Secondary atomization / D.R. Guildenbecher, C. López-Rivera, P.E. Sojka // *Experiments in Fluids*. – 2009. – Vol. 46, No. 3. – P. 371–402.
89. Feoktistov, D.V. Conditions for and characteristics of the dispersion

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

90. Glushkov, D.O. Experimental Research of the Initial Temperature and Additives Effect on the Ignition and Combustion Mechanisms of Composite Liquid Fuel in a High-Temperature Oxidizer / D.O. Glushkov, D.M. Klepikov, A.O. Nigay, K.K. Paushkina, A.O. Pleshko // *Applied Sciences (Switzerland)*. – 2023. – Vol. 13, No. 6. – Article number 3501.

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

92. Bertola, V. An impact regime map for water drops impacting on heated surfaces / V. Bertola // *International Journal of Heat and Mass Transfer*. – 2015. – Vol. 85. – P. 430–437.

93. Ajaev, V.S. Levitation and Self-Organization of Droplets / V.S. Ajaev, O.A. Kabov // *Annual Review of Fluid Mechanics*. – 2021. – Vol. 53, No. 1. – P. 203–225.

94. Orejon, D. Effect of ambient pressure on Leidenfrost temperature / D. Orejon, K. Sefiane, Y. Takata // *Physical Review E*. – 2014. – Vol. 90, No. 5. – Article number 053012.

95. Roisman, I.V. Thermal atomisation of a liquid drop after impact onto a hot substrate / I.V. Roisman, J. Breitenbach, C. Tropea // *Journal of Fluid Mechanics*. – 2018. – Vol. 842. – P. 87–101.

96. Lipson, N. Cooling of porous metal surfaces by droplet impact / N. Lipson, S. Chandra // *International Journal of Heat and Mass Transfer*. – 2020. – Vol. 152. – Article number 119494.

97. Aziz, S.D. Impact, recoil and splashing of molten metal droplets / S.D. Aziz, S. Chandra // *International Journal of Heat and Mass Transfer*. – 2000. – Vol. 43, No. 16. – P. 2841–2857.

98. Girard, F. Infrared Thermography Investigation of an Evaporating Sessile Water Droplet on Heated Substrates / F. Girard, M. Antoni, K. Sefiane // *Langmuir*. – 2010. – Vol. 26, No. 7. – P. 4576–4580.
99. Volkov, R.S. Research of temperature fields and convection velocities in evaporating water droplets using Planar Laser-Induced Fluorescence and Particle Image Velocimetry / R.S. Volkov, P.A. Strizhak // *Experimental Thermal and Fluid Science*. – 2018. – Vol. 97. – P. 392–407.
100. Glushkov, D.O. High-speed contactless measurements of temperature evolution during ignition and combustion of coal-based fuel pellets / D.O. Glushkov, R.I. Egorov, D.M. Klepikov // *International Journal of Heat and Mass Transfer*. – 2021. – Vol. 175. – Article number 121359.
101. Kuznetsov, G.V. Influence of roughness on polar and dispersed components of surface free energy and wettability properties of copper and steel surfaces / G.V. Kuznetsov, A.G. Islamova, E.G. Orlova, A.S. Ivashutenko, I.I. Shanenkov, I.Y. Zykov, D.V. Feoktistov // *Surface and Coatings Technology*. – 2021. – Vol. 422. – Article number 127518.
102. Ponomarev, K.O. Effect of the Heat Flux Density on the Evaporation Rate of a Distilled Water Drop / K.O. Ponomarev, E.G. Orlova, D.V. Feoktistov // *EPJ Web of Conferences*. – 2016. – Vol. 110. – Article number 01060.
103. Feoktistov, D.V. Spreading behavior of a distilled water droplet on a superhydrophobic surface / D.V. Feoktistov, E.G. Orlova, A.G. Islamova // *MATEC Web of Conferences*. – 2015. – Vol. 23. – Article number 01054.
104. van Oss, C.J. Interfacial Lifshitz—van der Waals and Polar Interactions in Macroscopic Systems / C.J. van Oss, M.K. Chaudhury, R.J. Good // *Chemical Reviews*. – 1988. – Vol. 88, No. 6. – P. 927–941.
105. Etzler, F.M. Determination of the Surface Free Energy of Solids / F.M. Etzler // *Reviews of Adhesion and Adhesives*. – 2013. – Vol. 1, No. 1. – P. 3–45.
106. Glushkov, D.O. Prospects for the Use of Metal Surfaces Modified by Nanosecond Laser Radiation for Energy Applications / D.O. Glushkov,

K.K. Paushkina, A.O. Pleshko, I. Zykov, E.G. Orlova, D.V. Feoktistov // *Energies*. – 2023. – Vol. 16, No. 24. – Article number 7979.

107. Može, M. Pattern geometry optimization on superbiphilic aluminum surfaces for enhanced pool boiling heat transfer / M. Može, M. Zupančič, I. Golobič // *International Journal of Heat and Mass Transfer*. – 2020. – Vol. 161. – Article number 120265.

108. Volkov, R.S. Planar laser-induced fluorescence diagnostics of water droplets heating and evaporation at high-temperature / R.S. Volkov, P.A. Strizhak // *Applied Thermal Engineering*. – 2017. – Vol. 127. – P. 141–156.

109. Volkov, R.S. Measuring the temperature of a rapidly evaporating water droplet by Planar Laser Induced Fluorescence / R.S. Volkov, P.A. Strizhak // *Measurement*. – 2019. – Vol. 135. – P. 231–243.

110. Xu, Z. An Evaluation of the van Oss-Chaudhury-Good Equation and Neumann's Equation of State Approach with Mercury Substrate / Z. Xu, Q. Liu, J. Ling // *Langmuir*. – 1995. – Vol. 11, No. 3. – P. 1044–1046.

111. Shlegel, N.E. Determination of integral characteristics of secondary atomization of fuel oil/water emulsion droplets / N.E. Shlegel, A. Klimenko, P.A. Strizhak // *Fuel*. – 2024. – Vol. 372. – Article number 132218.

112. Zaitsev, D. Dynamics of liquid film rupture under local heating / D. Zaitsev, D. Kochkin, O. Kabov // *International Journal of Heat and Mass Transfer*. – 2022. – Vol. 184. – Article number 122376.

113. Birdi, K.S. *Handbook of surface and colloid chemistry*. 4th ed. – CRC Press, 2015. – 708 p.

114. Quéré, D. Non-sticking drops / D. Quéré // *Reports on Progress in Physics*. – 2005. – Vol. 68, No. 11. – P. 2495–2532.

115. Bormashenko, E.Y. *Wetting of Real Surfaces*. – Berlin, Boston: De Gruyter, 2013. – 170 p.

116. Vargaftik, N.B. *International Tables of the Surface Tension of Water* / N.B. Vargaftik, B.N. Volkov, L.D. Voljak // *Journal of Physical and Chemical Reference Data*. – 1983. – Vol. 12, No. 3. – P. 817–820.

117. Minakov, A.V. Numerical simulation of impact interaction between a drop and a heated substrate: the effects of liquid evaporation and conjugate heat transfer / A.V. Minakov, V.A. Kuznetsov, M.V. Pukhovoy, O.A. Kabov // *Interfacial Phenomena and Heat Transfer*. – 2022. – Vol. 10, No. 1. – P. 47–62.
118. Kaushal, A. Solutio-thermo-hydrodynamics influenced evaporation kinetics of saline sessile droplets / A. Kaushal, V. Jaiswal, V. Mehandia, P. Dhar // *European Journal of Mechanics - B/Fluids*. – 2020. – Vol. 83. – P. 130–140.
119. Sigalotti, L.D.G. Smoothed Particle Hydrodynamics (SPH) Simulations of Drop Evaporation: A Comprehensive Overview of Methods and Applications / L.D.G. Sigalotti, C.A. Vargas // *CMES - Computer Modeling in Engineering and Sciences*. – 2025. – Vol. 142, No. 3. – P. 2281–2337.
120. Bilsing, C. 3D-3C measurements of flow reversal in small sessile drops in shear flow / C. Bilsing, U. Janoske, J. Czarske, L. Büttner, S. Burgmann // *International Journal of Multiphase Flow*. – 2025. – Vol. 182. – Article number 105017.
121. Rodriguez, O.M.H. Drop laden flows / O.M.H. Rodriguez, P. Angeli, D. Legendre, E. Climent, A. Soldati // *International Journal of Multiphase Flow*. – 2025. – Vol. 191. – Article number 105284.
122. Hampton, M.A. Influence of surface orientation on the organization of nanoparticles in drying nanofluid droplets / M.A. Hampton, T.A.H. Nguyen, A.V. Nguyen, Z.P. Xu, L. Huang, V. Rudolph // *Journal of Colloid and Interface Science*. – 2012. – Vol. 377, No. 1. – P. 456–462.
123. Ristenpart, W.D. Influence of Substrate Conductivity on Circulation Reversal in Evaporating Drops / W.D. Ristenpart, P.G. Kim, C. Domingues, J. Wan, H.A. Stone // *Physical Review Letters*. – 2007. – Vol. 99, No. 23. – Article number 234502.
124. Wang, Z. In situ observation of thermal marangoni convection on the surface of a sessile droplet by infrared thermal imaging / Z. Wang, Y.P. Zhao // *Journal of Adhesion Science and Technology*. – 2012. – Vol. 26, No. 12–17. – P. 2177–2188.

125. Pradhan, T.K. Thermocapillary convection inside a stationary sessile water droplet on a horizontal surface with an imposed temperature gradient / T.K. Pradhan, P.K. Panigrahi // *Experiments in Fluids*. – 2015. – Vol. 56, No. 9. – Article number 178.

126. Misyura, S.Y. Interaction of two drops at different temperatures: The role of thermocapillary convection and surfactant / S.Y. Misyura, R.S. Volkov, A.S. Filatova // *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*. – 2018. – Vol. 559. – P. 275–283.

127. Gelderblom, H. Evaporation-driven liquid flow in sessile droplets / H. Gelderblom, C. Diddens, A. Marin // *Soft Matter*. – 2022. – Vol. 18, No. 45. – P. 8535–8553.

128. Popov, Y.O. Evaporative deposition patterns: Spatial dimensions of the deposit / Y.O. Popov // *Physical Review E*. – 2005. – Vol. 71, No. 3. – Article number 036313.

129. Goy, N.A. Thermal Marangoni trapping driven by laser absorption in evaporating droplets for particle deposition / N.A. Goy, N. Bruni, A. Girot, J.P. Delville, U. Delabre // *Soft Matter*. – 2022. – Vol. 18, No. 41. – P. 7949–7958.

130. Aoki, Y. Fluid flow structures in an evaporating sessile droplet depending on the droplet size and properties of liquid and substrate / Y. Aoki, J. Tsuji, K. Okada, al -, M. Inaba, A. Zana, J. Quinson, M. Turchaninova, E. Melnikova, A. Gavrilina, Ly. Barash // *Journal of Physics: Conference Series*. – 2021. – Vol. 1730, No. 1. – Article number 012029.

131. Al-Sharafi, A. Heat transfer characteristics and internal fluidity of a sessile droplet on hydrophilic and hydrophobic surfaces / A. Al-Sharafi, B.S. Yilbas, A.Z. Sahin, H. Ali, H. Al-Qahtani // *Applied Thermal Engineering*. – 2016. – Vol. 108. – P. 628–640.

132. Pang, K.E. Flow Stability in shallow droplets subject to localized heating of the bottom plate / K.E. Pang, C. Cuvillier, Y. Kita, L. Náraigh // *Physical Review Fluids*. – 2024. – Vol. 9, No. 1. – Article number 014003.

133. Paul, A. Ambient-gas forced convection dictated evaporation kinetics

of generic sessile droplets / A. Paul, P. Dhar, U. Pal // International Communications in Heat and Mass Transfer. – 2024. – Vol. 159. – Article number 108072.

134. Lu, S. A numerical investigation of droplet bouncing behaviors on dual micro-structured superhydrophobic surfaces / S. Lu, H. Lu, W. Zhao, Z. Xiao // International Communications in Heat and Mass Transfer. – 2025. – Vol. 167. – Article number 109384.

135. Strizhak, P.A. The role of convection in gas and liquid phases at droplet evaporation / P.A. Strizhak, R.S. Volkov, S.Y. Misyura, S.I. Lezhnin, V.S. Morozov // International Journal of Thermal Sciences. – 2018. – Vol. 134. – P. 421–439.

136. Chandramohan, A. Marangoni Convection in Evaporating Organic Liquid Droplets on a Nonwetting Substrate / A. Chandramohan, S. Dash, J.A. Weibel, X. Chen, S.V. Garimella // Langmuir. – 2016. – Vol. 32, No. 19. – P. 4729–4735.

137. Barash, L.Y. Marangoni convection in an evaporating droplet: Analytical and numerical descriptions / L.Y. Barash // International Journal of Heat and Mass Transfer. – 2016. – Vol. 102, No. 5. – P. 445–454.

138. Vargaftik, N.B. Handbook of physical properties of liquids and gases : pure substances and mixtures. – Hemisphere Pub. Corp., 1983. – 758 p.

139. Bernardin, J.D. The leidenfrost point: Experimental study and assessment of existing models / J.D. Bernardin, I. Mudawar // Journal of Heat Transfer. – 1999. – Vol. 121, No. 4. – P. 894–903.

140. Agazhanov, A.S. Experimental study of the thermophysical properties for aluminum-magnesium alloy AMg3 / A.S. Agazhanov, D.A. Samoshkin, Y.M. Kozlovskii, S.V. Stankus // Journal of Physics: Conference Series. – 2021. – Vol. 2057, No. 1. – Article number 012101.

ПРИЛОЖЕНИЕ А

(справочное)

Ноу-хау

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
Федеральное государственное автономное
образовательное учреждение высшего образования
«Национальный исследовательский Томский политехнический университет» (ТПУ)

ПРИКАЗ

13.02.2026

№ 44-5/об

Об установлении режима
коммерческой тайны

В соответствии с Положением о коммерческой тайне, утвержденным приказом от 19.09.2024 № 263-1/од (далее – Положение), на основании протокола постоянно действующей экспертной комиссии Исследовательской школы физики высокоэнергетических процессов (далее - ИШФВП) ТПУ от 22.01.2026 № 1/26-НХ п р и к а з ы в а ю:

1. Установить режим коммерческой тайны в отношении следующей информации: НОУ-ХАУ «Способ создания бифильных поверхностей на основе комбинированной лазерно-химической модификации».

2. Определить защищаемую документальную среду в следующем составе: Способ включает двухэтапный процесс создания на алюминиевом сплаве (АМГ-3) поверхности с заданным контрастом смачивания (бифильной) при сохранении идентичной микротекстуры. На первом этапе

На втором этапе осуществляется

3. Установить ограничение доступа к информации, составляющей коммерческую тайну, и контроль за соблюдением порядка обращения с этой информацией в соответствии с требованиями действующего законодательства и Положения.

4. Допуск к защищаемой среде разрешить следующим лицам:

1) Феокистова Д.В., заместителя директора ИШФВП;

2) Клепикова Д.М., инженер-конструктор, Департамента автоматизации нефтегазовой отрасли группа конструирования программно-технических комплексов ООО "ЭлеСи-Про";



4084457

ПРИЛОЖЕНИЕ Б

(справочное)

Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



СВИДЕТЕЛЬСТВО

о государственной регистрации программы для ЭВМ

№ 2022663029

Программа обработки видеозаписей для построения температурных полей нестационарных процессов горения и взрыва методом высокоскоростной двухцветной пирометрии

Правообладатель: *федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский Томский политехнический университет» (RU)*

Авторы: *Глушков Дмитрий Олегович (RU), Клепиков Дмитрий Михайлович (RU), Паушкина Кристина Константиновна (RU)*

Заявка № 2022662736

Дата поступления 11 июля 2022 г.

Дата государственной регистрации

в Реестре программ для ЭВМ 11 июля 2022 г.



*Руководитель Федеральной службы
по интеллектуальной собственности*

ДОКУМЕНТ ПОДПИСАН ЭЛЕКТРОННОЙ ПОДПИСЬЮ
Сертификат 68b80077e14e1910a94edbd24145d5c7
Владелец: **Зубов Юрий Сергеевич**
Действителен с 24.05.2022 по 25.05.2023

Ю.С. Зубов

ПРИЛОЖЕНИЕ В

(справочное)

Акт о внедрении

TOMSK POLYTECHNIC UNIVERSITY



ТОМСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
федеральное государственное автономное
образовательное учреждение высшего образования
«Национальный исследовательский Томский политехнический университет» (ТПУ)



УТВЕРЖДАЮ
Директор ИШЭ
А.С. Матвеев
«09» февраля 2026 г.

АКТ О ВНЕДРЕНИИ

результатов диссертационной работы

Клепикова Дмитрия Михайловича

в образовательный процесс Национального исследовательского
Томского политехнического университета

Настоящим актом удостоверяется, что результаты диссертационной работы Клепикова Д.М. по тематике повышения интенсивности теплообмена на структурированных поверхностях на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 1.3.14 – Теплофизика и теоретическая теплотехника используются в образовательном процессе Инженерной школы энергетики Национального исследовательского Томского политехнического университета при проведении лабораторных работ по дисциплине «Конструирование элементов и блоков систем управления» направления подготовки 13.04.01 Теплоэнергетика и теплотехника по профилю «Автоматизация теплоэнергетических процессов».

Руководитель ООП
«Автоматизация теплоэнергетических процессов» _____ П.А. Стрижак

И.о. заведующего кафедрой –
руководителя научно-образовательного
центра И.Н. Бутакова на правах кафедры _____ А.В. Гиль

ПРИЛОЖЕНИЕ Г

(справочное)

Акт об использовании

ИНЖИНИРИНГОВАЯ КОМПАНИЯ

«ЭлеСи-Про»

ООО «ЭлеСи-Про»
ИНН 7017042202, КПП 701701001
634021, Россия, г. Томск, ул. Алтайская, 161а
тел. (3822) 601-000, факс (3822) 601-001
system@elesy.ru, www.elesy.ru

Акт об использовании результатов НИР

ООО «ЭлеСи-Про» основано в 2001 году и зарегистрировано в городе Томске. Компания осуществляет деятельность в сфере инжиниринга и разработки технических решений для автоматизированных систем, включая электрическую распределительную и регулирующую аппаратуру. С января 2025 года управление деятельностью ООО «ЭлеСи-Про» осуществляется акционерным обществом «ЭЛЕСИ», применяющим комплексный подход к разработке, внедрению и сопровождению технических систем с учетом индивидуальных требований заказчиков.

В рамках своей деятельности ООО «ЭлеСи-Про» рассматривает современные научные и инженерные подходы к повышению эффективности теплообмена в технических системах. В связи с этим в работе компании были использованы результаты научно-исследовательской работы по тематике повышения интенсивности теплообмена на структурированных поверхностях. Полученные результаты включают сведения о влиянии параметров поверхности и свойств смачивания на процессы теплопереноса и распределение температурных полей.

Использование этих результатов позволило ООО «ЭлеСи-Про» проводить аналитическую оценку тепловых процессов, формировать инженерные рекомендации и обосновывать подходы к проектированию и оптимизации тепловых схем в рамках инжиниринговых проектов. Результаты научно-исследовательской работы применялись для анализа и разработки концептуальных решений капельного и пленочного

Серебряков А.С.
руководитель группы конструирования ПТК
тел.: (3822) 601-000, внут. 1480
сот.: +7 913-858-16-74
alexander.serebryakov@elesy.ru

охлаждения элементов микроэлектроники, направленных на повышение эффективности теплоотдачи с учетом условий эксплуатации и требований заказчиков.

Применение результатов работы подтверждает их практическую значимость и возможность использования в инжиниринговой деятельности ООО «ЭлеСи-Про» при выполнении аналитических, проектных и научно-исследовательских работ, связанных с совершенствованием технических систем и повышением эффективности теплообменных процессов.

Технический директор департамента
автоматизации промышленных производств
ООО «ЭлеСи-Про»

22.12.2025



А.В. Хлыбов

Серебряков А.С.
руководитель группы конструирования ПТК
тел.: (3822) 601-000, внут. 1480
сот.: +7 913-858-16-74
alexander.serebryakov@elesy.ru