

На правах рукописи

РОМАНОВ АЛЕКСЕЙ СЕРГЕЕВИЧ

**ОСОБЕННОСТИ ТЕПЛОМАССОБМЕНА КАПЕЛЬ ЖИДКОСТЕЙ ПРИ
ВЗАИМОДЕЙСТВИИ С ПЕРЕГРЕТЫМИ МЕЗОСТРУКТУРНЫМИ И
НАНОСТРУКТУРИРОВАННЫМИ ПОВЕРХНОСТЯМИ**

Специальность 01.04.14 – Теплофизика и теоретическая теплотехника

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени

кандидата технических наук

Москва – 2013

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего профессионального образования «Национальный исследовательский университет «МЭИ» на кафедре низких температур

Научный руководитель: доктор технических наук, профессор
Дмитриев Александр Сергеевич

Официальные оппоненты: Дедов Алексей Викторович, доктор технических наук, доцент, профессор кафедры Общей физики и ядерного синтеза ФГБОУ ВПО «Национальный исследовательский университет «МЭИ»

Куценко Кирилл Владленович, кандидат технических наук, доцент кафедры Теплофизики ФГАОУ ВПО «Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное учреждение науки «Объединенный институт высоких температур РАН»

Защита состоится 28 июня 2013 года в 10-00 на заседании диссертационного совета Д 212.157.04 при ФГБОУ ВПО «НИУ «МЭИ» по адресу: 111250, Москва, Красноказарменная ул., д.17, корп. Т, кафедра инженерной теплофизики им. В.А. Кириллина, комн. Т-206.

С диссертацией можно ознакомиться в научно-технической библиотеке ФГБОУ ВПО «НИУ «МЭИ».

Автореферат разослан «___» мая 2013 г.

Отзывы на автореферат с подписями, заверенными печатью учреждения, просим направлять по адресу: 111250, Москва, Красноказарменная ул., д.14, Ученый Совет ФГБОУ ВПО «НИУ «МЭИ».

Ученый секретарь
диссертационного совета Д 212.157.04
к.т.н.

Ястребов А.К.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. Развитие многих направлений фундаментальной науки и индустриальных приложений требует глубоких и всесторонних исследований процессов теплообмена в различных условиях. Особый интерес сегодня вызывают различные системы охлаждения энергетического оборудования (лопатки турбин, суперконденсаторы, литий-ионные и литий-полимерные батареи, другие системы хранения энергии, системы криостабилизации сверхпроводящих магнитов, аварийные режимы работы реакторов и т.п.), микро- и наноэлектроника (микрочипы, блоки памяти, блоки обработки видеoinформации и т.д.), оптоэлектроника (полупроводниковые лазеры, мощные светодиоды), мощные серверы в дата центрах («облачные» технологии) и т.д. Среди многих возможных технологий охлаждения в последнее время все большее внимание привлекает старая, но как оказывается вполне эффективная и надежная система струйного охлаждения. При этом возникает необходимость изучения процессов интенсивного теплообмена, поскольку при достаточно больших тепловых потоках всегда возникает наряду с жидкой, и паровая фаза, и развиваются процессы испарения и кипения.

Данная диссертационная работа посвящена изучению теплообмена ограниченных объемов жидкости (капель) при их взаимодействии с перегретыми твердыми подложками из различных материалов, включая подложки с мезоскопической и наноструктурной морфологией.

Ранее исследования в указанной области теплообмена ограниченных объемов жидкости с перегретыми поверхностями активно исследовались в классических работах отечественных и зарубежных ученых. Несмотря на полученные результаты, в последнее время интерес к данным проблемам возник как в связи с возможностью использования новейших методов оптической диагностики (как в видимом, так и в инфракрасном диапазоне длин волн, включая высокоскоростные видеокамеры), появлением новых возможностей в измерениях температуры, топографических и гетерофазных свойств поверхности, так и с разработкой технологий изготовления новых поверхностей с мезоскопической и наноструктурированной морфологиями.

Таким образом, взаимодействие капель с поверхностью с учетом теплообмена – большая область научных и прикладных разработок и технологий. Наиболее важными приложениями являются:

1. Капельное охлаждение в слаботочной электронике (микро- и наноэлектронике) и энергетике.
2. Управление процессами теплообмена в химической технологии, энергетике, авиационно-космических технологиях.
3. Интенсификация теплообмена в системах хранения и транспортировки энергии (суперконденсаторы, топливные элементы, литий-ионные аккумуляторы).
4. Капельное орошение в условиях интенсивных потоков энергии и т.п.
5. Критические и аварийные режимы работы энергетического оборудования (взрывное вскипание и т.д.).

6. Корпускулярные мишени в энергетике высоких плотностей энергии.
7. Капельная эрозия нагретой поверхности.
8. Охлаждение изделий в металлургической промышленности в новых режимах.
9. Аварийные режимы в зоне плавления ТВЭЛов.

Данные приложения требуют интенсивного отвода тепла, который наиболее эффективно может быть осуществлен только при испарении жидкости. Во всех случаях происходит взаимодействие холодных капель с сильно разогретыми поверхностями с температурой, намного превышающей температуру кипения жидкости. Такие условия приводят к переходу капель в пленочный режим кипения, что известно как эффект Лейденфроста.

Данный эффект является важной технической проблемой из-за очень сильного ограничения теплового потока с перегретой поверхности. Тепловой поток через пленку пара пренебрежимо мал по сравнению с теплотой парообразования жидкости, необходимой для испарения капель и отвода тепла. Поведение, например, одиночных холодных капель, ударяющихся о нагретую поверхность, напрямую определяет эффективность систем распылительного охлаждения, которые в настоящее время являются одними из наиболее эффективных методов охлаждения теплонагруженных поверхностей. Распылительное охлаждение применяется в особых случаях: для охлаждения микроэлектронных приборов, оптоэлектроники, радиологических приборов. Этим обусловлен значительный интерес к исследованию взаимодействия капель с нагретой поверхностью.

Драматическое понижение теплового потока вследствие перехода к пленочному режиму кипения является основной проблемой капельного охлаждения высокотемпературных поверхностей. Один из основных путей повышения теплового потока связан с применением текстурированных подложек, в частности, с различными типами шероховатости, упорядоченными микроструктурами и специальными покрытиями.

Цель исследований и постановка задачи

Основные цели настоящей работы следующие:

- 1). Исследование влияния морфологии поверхности (внутренней мезо- и наноструктур) на основные характеристики теплообмена от режима испарения до режима Лейденфроста.
- 2). Изучение смачиваемости поверхности различных морфологических структур из различных материалов, включая температурные зависимости контактных углов.
- 3). Определение влияния морфологии и химического состава материалов и рабочих жидкостей на скорость испарения капель на нагретой поверхности.
- 4). Определение переходов в режиме Лейденфроста между различными подрежимами в зависимости от типа мезоструктурной и наномасштабной морфологии.
- 5). Определение влияния масштабов поверхности и температурного уровня, а также свойств жидкости на переходные режимы испарения и кипения.

5). Изучение неустойчивых режимов Лейденфроста и их срыва, в частности, в режим взрывного вскипания.

Для достижения поставленных целей решались следующие задачи:

- 1). Изготовление образцов со сложной морфологией поверхности.
- 2). Подготовка стенда для изучения процессов кипения и смачивания на основе измерительного комплекса EasyDrop.
- 3). Исследование внутренней морфологии образцов при помощи электронной микроскопии.
- 4). Измерение контактных углов смачивания различных образцов различными жидкостями.
- 4). Измерение динамики испарения капель рабочих жидкостей на различных поверхностях.

Научная новизна работы

1. Исследованы процессы испарения и кипения на перегретых мезоскопических подложках для различных жидкостей (вода, этиловый спирт, изооктан). Показано решающее влияние внутреннего устройства мезоструктур и наноструктур, и морфологии поверхности на режимы теплообмена.
2. Обнаружен эффект нарушения режима Лейденфроста на мезоскопических и наноструктурированных подложках и объяснен механизм такого эффекта.
3. Выявлено незначительное влияние смачиваемости различными жидкостями таких поверхностей на режимы теплообмена.
4. Предложена теоретическая модель нарушения эффекта Лейденфроста на мезоскопических подложках; проведены расчеты скорости испарения на подложках с подавленным эффектом Лейденфроста.
5. Обнаружен новый механизм кипения капель на наноструктурированных подложках на основе оксидированного нанопористого алюминия, связанный с быстрым переходом к взрывному вскипанию; проведено качественное объяснение указанного эффекта.
6. Проведены исследования в инфракрасном диапазоне спектра, позволившие выявить особенности поведения жидких объемов при испарении на перегретых подложках.
7. Экспериментально доказан охлаждающий эффект испарения капель со значительно перегретой поверхности.

На защиту выносятся следующие результаты и положения

1. Результаты измерения углов смачивания мезо- и наноструктурированных подложек различными типами жидкостей.
2. Экспериментальные результаты с исследований процессов испарения и кипения капель на мезоструктурированных подложках.
3. Сравнительные результаты влияния смачиваемости поверхности на процессы кипения капель на них.
4. Модель срыва эффекта Лейденфроста при кипении капель на мезоструктурированных поверхностях.

Теоретическая значимость исследования состоит в выявлении закономерностей теплообмена капель на перегретых поверхностях и объяснению механизма подавления эффекта Лейденфроста на них. Основные положения и выводы могут быть использованы при дальнейшем развитии теории тепломассообмена капель с мезоскопическими и наномасштабными поверхностями.

Экспериментальная значимость работы. Впервые были изготовлены подложки с покрытиями из микросфер с внутренней мезоструктурой и исследованы режимы испарения и кипения капель на них. Полученные экспериментальные данные позволили построить теоретическую модель взаимодействия капель с такими поверхностями.

Практическая значимость исследования состоит в том, что предложенные текстурированные и мезоскопические поверхности могут быть использованы для исключения возникновения режима Лейденфроста на капельно-охлаждаемых поверхностях, тем самым, многократно повысив их эффективность.

Достоверность научных положений, результатов и выводов. Достоверность научных результатов подтверждается сравнением с результатами других авторов при испарении капель на поверхностях со сложной морфологией, скоростями испарения в режиме Лейденфроста при сравнении с данными других исследований, согласием результатов расчетных моделей и опытных данных. Полученные данные по контактному углу в исследованных ранее диапазонах температур хорошо согласуются с данными настоящей работы. Неустойчивости, обнаруженные в настоящей работе, находят качественное подтверждение в более ранних исследованиях парового взрыва.

Публикации. По теме диссертации опубликовано шесть работ [1-6].

Апробация работы.

Материалы диссертации докладывались автором на конференциях «Повышение эффективности энергетического оборудования - 2012», XXII Международная научно-техническая конференция, школа молодых специалистов и выставка по фотоэлектронике и приборам ночного видения, 10 Международная конференция «Актуальные вопросы теплофизики и физической гидродинамики», XII Международная конференция «Оптические методы исследования потоков» ОМИП-2013.

Структура и объем работы. Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, заключения и списка литературы. Объем диссертации составляет 165 страниц, включая 108 рисунков.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** обосновывается актуальность темы, формулируются цели и задачи диссертационной работы.

В **первой главе** приводится критический обзор работ, посвященных тепломассообмену ограниченных объемов жидкости. Описываются режимы испарения капель, режимы смачивания поверхностей, влияние морфологии

поверхности на ее смачиваемость, режимы Лейденфроста и условия влияющие на него. Большая часть обзора посвящена влиянию морфологии, смачиваемости поверхностей на режимы кипения капель на них.

Во **второй главе** приводится схема экспериментальной установки, а так же описание использованных образцов, методик измерения и оценки погрешностей.

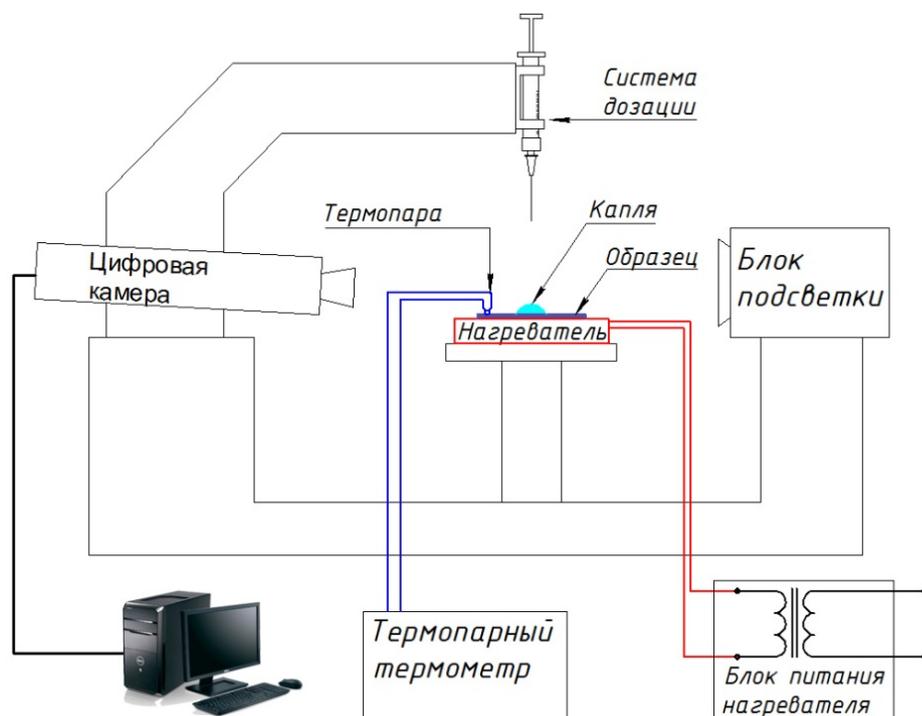


Рис.1. Схема и основные блоки экспериментальной установки.

В разделе 2.1 описывается измерительный комплекс на базе гониометра EasyDrop изготовленный автором для изучения процессов испарения и кипения капель на поверхности образцов.

Данный гониометр оснащается системой для автоматического дозирования капель с высокой точностью. Объем капель во всех экспериментах составлял 5 мкл (диаметр капли 2.1 мм). В данном гониометре для визуализации капли используется преломление капель световых лучей, идущих от осветителя и попадающих в камеру. Таким образом, формируется светлопольное изображение, где на светлом фоне, капля выглядит более темной. Оптическая ось камеры направлена под небольшим углом к предметному столику, что позволяет наблюдать контактную линию капли с твердым телом. Углы измеряются программно путем построения соответствующих касательных и контактных линий. Для проведения экспериментов с кипением капель, был изготовлен нагреватель, который был установлен на стандартном держателе гониометра и изолирован от него слоем теплоизоляции. Нагреватель представлял собой две стальные пластины между которыми на керамическом изоляторе уложена нихромовая проволока. Максимальная мощность нагревателя составляла 60 Вт и контролировалась

путем изменения напряжения на блоке питания нагревателя. Исследуемые образцы размещались непосредственно на поверхности нагревателя.

В разделе 2.1.2 дано описание приборов измерения температуры: термопарного термометра Extech EA10 и инфракрасной камеры высокого разрешения ARTcam 320.

Раздел 2.2 содержит описание исследуемых образцов. Которые представляли собой поверхности относительно гладкие, шероховатые, с мезоскопической и наноструктурной морфологией. Основанием для их выбора были указанные в главе 1 аномалии поведения капель в режиме Лейденфроста в зависимости от морфологии материалов. В качестве базовых поверхностей, на которые наносились различные покрытия использовались следующие подложки:

1. Чистая никелевая пластина; размер 20x20 мм, толщина 1 мм.
2. Кремниевые микрорезисторные пластины диаметром 100 мм, толщиной 0.55 мм.

На никелевой поверхности была сформирована мезоструктура приблизительно из 25 слоев углеродных микросфер средним диаметром 7 мкм. На кремниевых пластинах были сформированы мезоструктуры из металлических монодисперсных микросфер диаметром. Отличие разных образцов состояло в диаметре металлических микросфер – 50, 110, 300 мкм. Пример структуры изображен на рис.2 (слева).

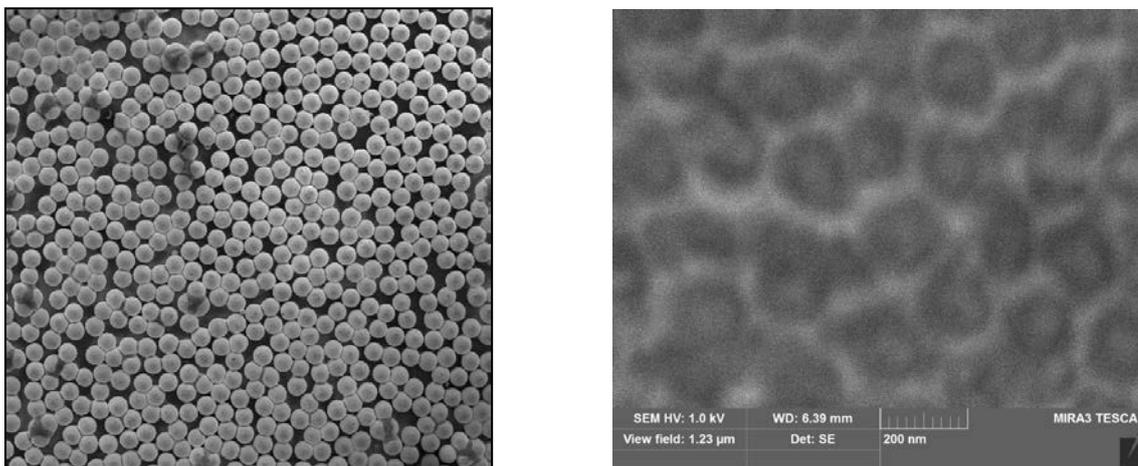


Рис.2. СЭМ изображение кремниевой подложки покрытой металлическими микросферами 300мкм (слева) и морфология и наноструктура подложек с технологий ALOX™ и сканирующая электронная микроскопия подложек такого типа (справа)

Подобные мезоскопические поверхности для изучения испарения и кипения капель были сформированы впервые в ходе выполнения работы и аналогов не имеют. Для исследования наномасштабных поверхностей, были использованы различные образцы анодированных пластинок нанопористого оксида алюминия. Пластины были предоставлены компанией RUSALOX и выполнены по уникальной электрохимической алюмооксидной технологии, основанной на сочетании процесса анодного окисления (анодирования)

алюминия с вакуумным нанесением металлов и фотолитографией. Морфология и наноструктура указанного материала представлена на рис.2 (справа).

В разделе 2.3 описаны теплофизические свойства применяемых рабочих жидкостей – воды, этилового спирта, изооктана. Приведено обоснование их выбора.

В разделе 2.4 приведено описание методики измерений контактных углов, объема капель, а так же приведена оценка погрешности измерений. Во всех экспериментах измерялись кажущиеся статические контактные углы сразу после нанесения капли. Измерения динамики объема капель производилось косвенным образом, путем измерений элементов на кадрах отснятых видео. В качестве масштабного фактора, на кадрах видео всегда присутствовала игла дозатора с известным диаметром 0.50 мм. Путем пропорционального пересчета размеров иглы вычислялись характерные размеры капель, по которым, затем, вычислялся объем жидкости.

В главе 3 приводятся основные результаты измерений.

В разделе 3.1 представлены результаты измерений краевых углов смачивания различных подложек рабочими жидкостями (табл.1,2).

Табл.1. Краевые углы смачивания подложек с покрытием из микросфер различного диаметра.

Подложка\ жидкость	Сферы d=300мкм	Сферы d=110мкм	Сферы d=50мкм	Углеродные микросферы
Вода 21°C 45°C	89±5° 90±5° 	84±5° 95±13° 	71±5° 68±5° 	129±4° 126±5° 
Этиловый спирт 21°C - 75°C	Впитывание 	Впитывание ~0° 	Впитывание ~0° 	Впитывание ~0° 
Изооктан 21°C - 85°C	Впитывание ~0° 	Впитывание ~0° 	Впитывание ~0° 	Впитывание ~0° 

Табл.2. Краевые углы смачивания подложек из чистого никеля и анодированного алюминия рабочими жидкостями при температурах ниже температуры кипения.

Образец\Жидкость	Вода	Спирт	Изооктан
Чистый никель	52±3°	12±3°	~3°
Анодированный алюминий (Новосибирск)	126±3°	18±3°	~0°
Анодированный алюминий ALOX; толщина 20мкм	71±5°	10±2°	~0°
Анодированный алюминий ALOX; толщина 100мкм	75±5°	11±2°	~0°
Анодированный алюминий ALOX; взрывное вскипание	68±5°	7±2°	~0°

Температуры подложек устанавливалась ниже температуры кипения жидкостей.

В разделе 3.3 приведены результаты измерений и описание режимов кипения капель на подложках в зависимости от температуры.

Результаты измерений представлены в графиках зависимости объема капли от времени испарения. Обнаружены новые эффекты, связанные, по всей видимости, с особенным характером растекания пара под испаряющейся каплей внутри мезоскопических и наноструктурных поверхностей.

В основной части работы, исследовались два основных режима кипения капель на перегретых поверхностях, а именно, режим Лейденфроста на гладких поверхностях и режим пузырькового кипения на образцах с покрытием из микросфер.

На гладких подложках не наблюдалось отклонения полученных результатов от ранее известных. Капли при достижении подложкой критической температуры переходили в пленочный режим кипения. Время испарения составляло десятки и сотни секунд, в зависимости от жидкости (рис.3).

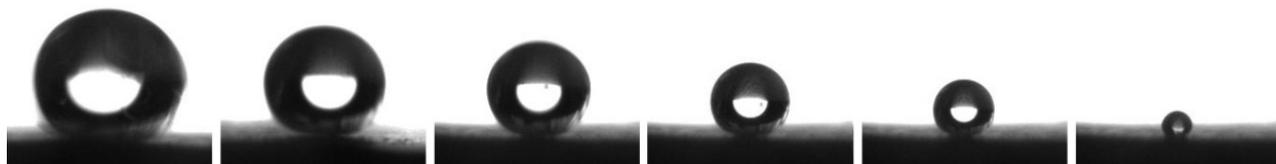


Рис.3. Капля воды на чистой никелевой пластинке – эффект Лейденфроста; $T=240^{\circ}\text{C}$; время испарения более 100 сек

Однако, на мезоскопических структурах вплоть до максимальных температур перегрева перехода в пленочный режим кипения не наблюдалось. При этом время испарения капль составляло от долей до единиц секунд (рис.4).

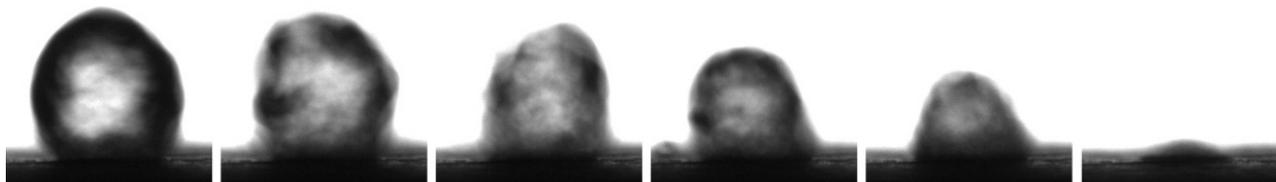


Рис.4. Капля воды на подложке с покрытием из углеродных микросфер – подавление эффекта Лейденфроста; $T=240^{\circ}\text{C}$; время испарения 7 сек

Зависимость времени испарения капель воды от температуры подложки с покрытием из углеродных микросфер представлена на рис.5. Время испарения капли при повышении температуры вплоть до точки Лейденфроста на гладкой поверхности ($T_s \approx 140^{\circ}\text{C}$) уменьшается с ростом температуры. При дальнейшем увеличении температуры (выше точки Лейденфроста) время испарения изменяется незначительно и составляет примерно $t \sim 7$ сек.

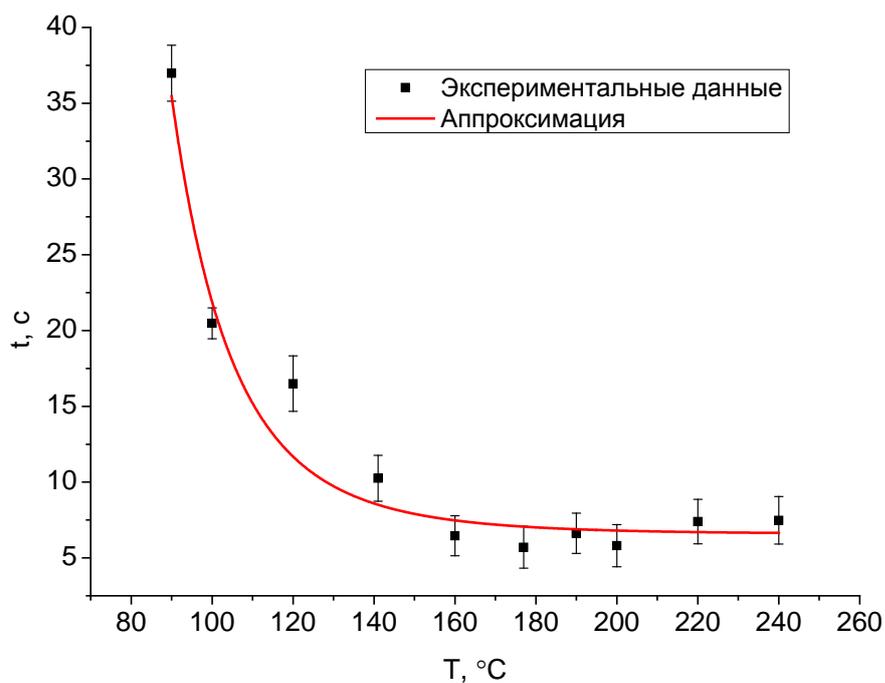


Рис.5. График зависимости времени испарения капель воды от температуры поверхности на подложке из углеродных микросфер

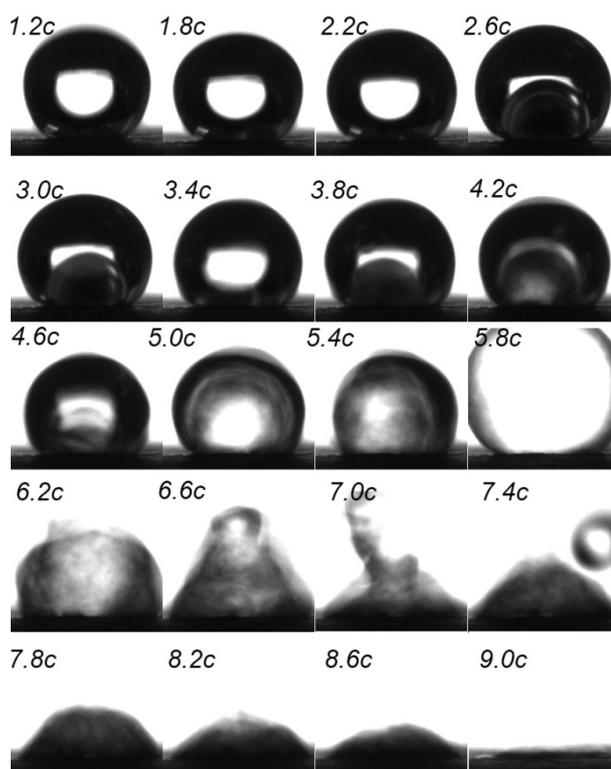


Рис.6. Динамика испарения капель воды с подложки с углеродными микросферами (температура подложки 160°C)

Динамика испарения капель воды с подложки с углеродными микросферами при температуре подложки 160°C представлена на последовательных фотографиях рис.6.

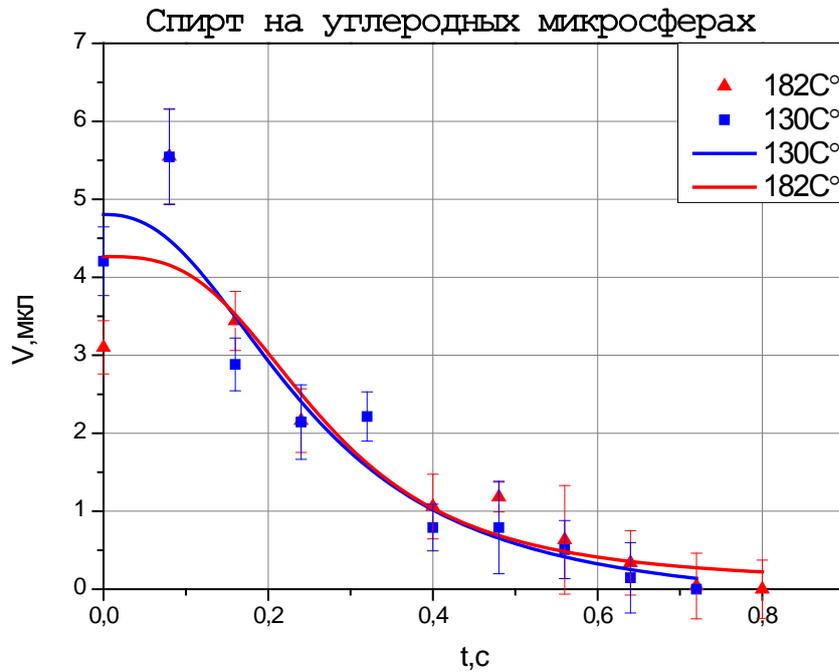


Рис.7. График зависимости объема капель спирта от времени испарения (никелевая подложка с покрытием из углеродных микросфер при различных температурах)

Остальные жидкости показывают аналогичное поведение на мезоскопических подложках. Для примера представлены графики зависимости объема капель спирта от времени испарения (никелевая подложка с покрытием из углеродных микросфер при различных температурах) (рис.7).

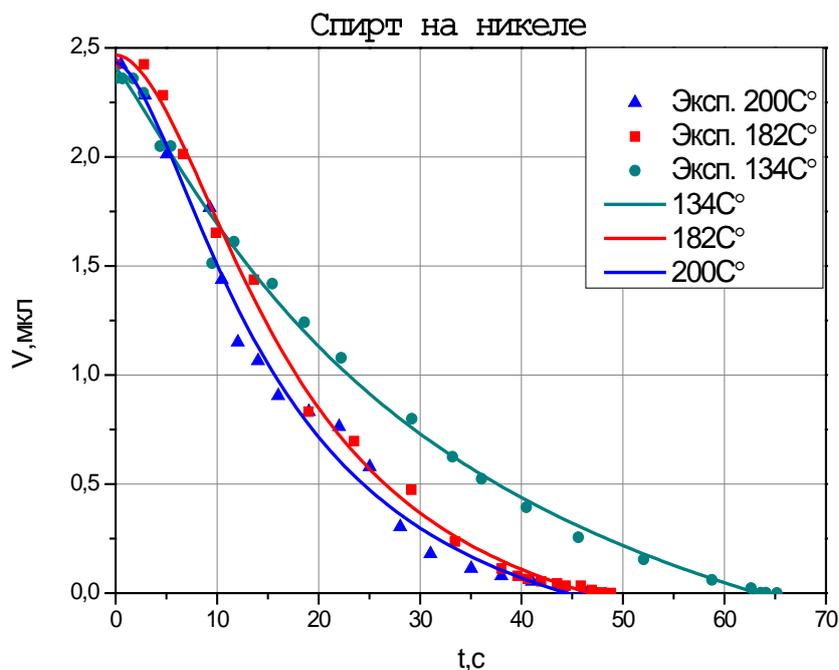


Рис.8. График зависимости объема капель спирта от времени испарения (гладкая никелевая пластинка при различных температурах)

Хорошо видно, что вне зависимости от температуры темп испарения спирта на микросферах практически постоянен, что говорит о слабом вкладе теплопроводности пара и теплопроводности подложки в скорость испарения. Основное значение имеет удаление пара через мезоскопическую структуру подложки путем его растекания.

Для сравнения приведены графики зависимости объема капель от времени на гладкой никелевой подложке (рис.8).

Обобщенные данные о поведении ограниченных объемов жидкостей на перегретой поверхности приведены в таблице 3.

Таблица 3. Обобщенное поведение ограниченных объемов жидкостей на перегретых поверхностях.

Образец	Режим испарения	Жидкость/время испарения
1. Чистая Ni пластинка	Лейденфрост	1.1 Вода/ >100 с 1.2 Спирт/ 45-65 с 1.3 Изооктан/ 12-17 с
2. Ni пластинка с углеродными микросферами	Пузырьковый режим кипения/ Подавление Лейденфроста	2.1 Вода/ 7-10 с 2.2 Спирт/ 0,7-0.8 с 2.3 Изооктан/ 0.4-0.7 с
3. Микросферы 110, 300мкм	Пузырьковый режим кипения/ Подавление Лейденфроста	3.1 Вода/ 3-7 с 3.2 Спирт/ 1.0-1.4 с 3.3 Изооктан/ 0.15-0.5 с
4. Микросферы 50мкм	Пузырьковый режим кипения/ Подавление Лейденфроста	4.1 Вода/ 3-8 с 4.2 Спирт/ 1.2-1.3 с 4.3 Изооктан/ 0.5-0.9 с

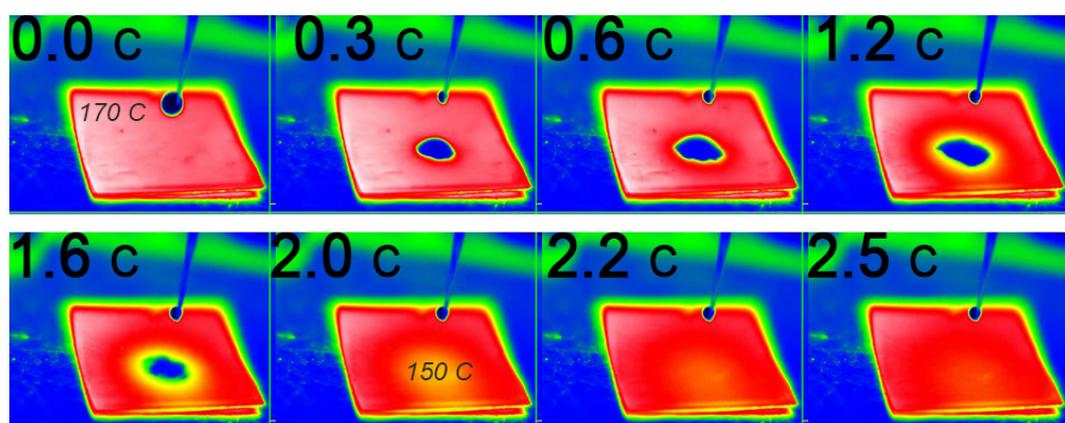


Рис.9. Инфракрасные изображения падения капель воды на мезоскопическую подложку из углеродных микросфер (температура 170⁰С)

В разделе 3.4 приведены снимки с термовизионной камеры процесса испарения капель с мезоскопических подложек.

На рис.9 приведены инфракрасные изображения падения капель воды на мезоскопическую подложку из углеродных микросфер (температура $T_s \approx 170^\circ\text{C} > T_L 170^\circ\text{C}$). Видно, что режим Лейденфроста не возникает, а подавляется быстрым проникновением пара внутрь мезоскопической подложки, так что парового слоя под каплей для ее левитации над перегретой подложкой не возникает.

Глава 4 посвящена моделям кипения капель на различных поверхностях.

В разделе 4.3 представлена модель срыва режима Лейденфроста на мезоскопических поверхностях.

Поведение капель жидкости над нагретой поверхностью определяется в устойчивом режиме балансом веса капли и вязких сил в пленке пара. Если последний тип сил пренебрежимо мал (температура поверхности меньше температуры Лейденфроста), то капля будет в определенном режиме (в зависимости от характера поверхности) смачивать поверхность. Однако, существует еще режим, в котором подавляется эффект Лейденфроста, даже когда температура поверхности выше температуры Лейденфроста. Это проявляется на мезоскопических и наноструктурированных поверхностях. В этих ситуациях возможны два различных новых типа поведения капель и контактных границ капля-пар-подложка.

Режим, который впервые наблюдался в данной работе имеет место для мезоскопических структур. Роль контакта между каплей и структурой менее важна, чем эффект подавления стабильного течения пара под каплей, в результате чего не может устанавливаться течения пара под каплей, а значит возникновения вязкого давления и возникновения эффекта левитации капель даже при температурах выше температуры Лейденфроста.

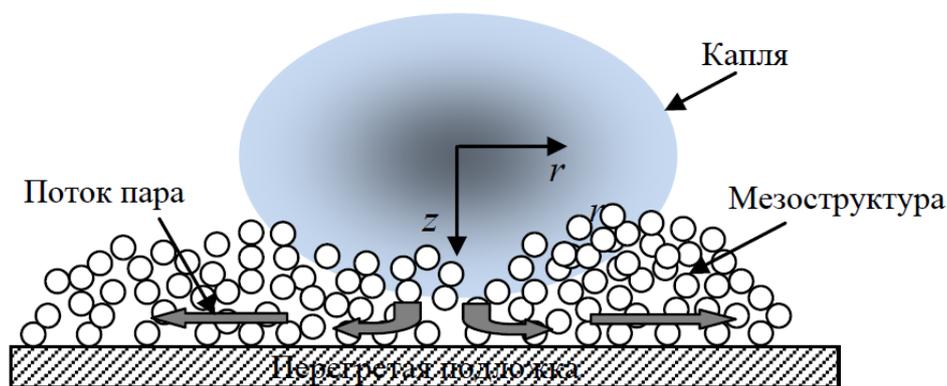


Рис.10. Схема подавления эффекта Лейденфроста внутри мезоструктуры

В рамках указанной модели запишем уравнение движение пара в двумерном случае, как показано на рис.10

$$\frac{d^2 v_r}{dz^2} = \frac{\varepsilon}{\eta} \frac{dp}{dr} + \frac{\varepsilon v_r}{k} \quad (1)$$

где v_r - скорость течения пара в радиальном направлении, p - давление пара, η - вязкость пара, ε, k - соответственно пористость и проницаемость мезоскопической поверхности нагрева. Приведенное уравнение позволяет вычислить давление со стороны пара на каплю. При единичной пористости и бесконечной проницаемости наступает случай стандартной модели движения пара под каплей в эффекте Лейденфроста. Средняя скорость пара под каплей в точке r определяется скоростью генерации пара под каплей. Тепловой поток от нагретой поверхности через слой пара с теплопроводностью λ_v и мезоструктуру с теплопроводностью λ_m , можно определить из соотношения $q = \Delta T \lambda_{eff} / \delta$, где λ_{eff} - эффективная теплопроводность мезоскопической структуры с паром, которую можно определить, например, по соотношению Максвелла $\lambda_{eff} = \lambda_v \phi + \lambda_m (1 - \phi)$, где ϕ - объемная доля пара, которая зависит от геометрии мезоструктуры. В случае микросфер эта объемная доля легко вычисляется, зная диаметр микросфер и их геометрическое расположение в мезоструктуре (например, см. рис.2). Баланс массы пара при испарении определяется отношением между средней скоростью пара и тепловым потоком

$$\langle v \rangle A_d \rho_v = A_R q / L \quad (2)$$

где ρ_v - плотность пара, A_d, A_R - площади испарения на капле и области передачи тепла (для эффекта Лейденфроста на гладкой поверхности $A_d = A_R$), L - скрытая теплота парообразования. Для мезоструктуры, показанной на рис.6, последнее соотношение может быть приближенно записано как

$$(2\pi r \delta) \langle v \rangle \rho_v = (\pi r^2) q / L \quad (3)$$

Откуда находим среднюю скорость течения пара

$$\langle v \rangle = \frac{\Delta T \lambda_{eff}}{2\delta^2 L \rho_v} r = \mathcal{G} r \quad (4)$$

Полученное соотношение аналогично выражению для скорости ламинарного течения между двумя параллельными плоскостями. Профиль скорости пара в этом случае можно записать как

$$v = (3/2) \langle v \rangle \left[1 - 4 \left(\frac{z}{\delta} \right)^2 \right] = (3/2) \left[1 - 4 \left(\frac{z}{\delta} \right)^2 \right] \mathcal{G} r \quad (5)$$

Зная v , нетрудно получить

$$\frac{dv}{dz} = \frac{12\mathcal{G}}{\delta^2} rz, \quad \frac{d^2 v}{dz^2} = \frac{12\mathcal{G}}{\delta^2} r \quad (6)$$

Откуда получаем выражение для давления пара

$$\frac{dp}{dr} = -\eta \mathcal{G} r \left(\frac{12}{\varepsilon \delta^2} + \frac{1}{k} \right) \quad (7)$$

Последнее уравнение нетрудно проинтегрировать, что дает

$$p(r) = p_0 + \frac{\eta \mathcal{G}}{2} \left(\frac{12}{\varepsilon \delta^2} + \frac{1}{k} \right) (R_d^2 - r^2) = p_0 + \frac{\eta \Delta T \lambda_{eff}}{4\delta^2 L \rho_v} \left(\frac{12}{\varepsilon \delta^2} + \frac{1}{k} \right) (R_d^2 - r^2) \quad (8)$$

где p_0 - давление пара на внешней границе капли. Общая сила, действующая на каплю со стороны пара находится интегрированием по поверхности капли

$$F_v = \iint_A p dA = \frac{\eta \vartheta \pi}{2} \left(\frac{12}{\varepsilon \delta^2} + \frac{1}{k} \right) R_d^4 = \frac{\eta \Delta T \lambda_{eff} \pi}{4 \delta^2 L \rho_v} \left(\frac{12}{\varepsilon \delta^2} + \frac{1}{k} \right) R_d^4 \quad (9)$$

Таким образом, сила со стороны пара зависит от диаметра капли и от толщины эффективного слоя пара. Как только силы левитации недостаточны для уравнивания веса капли, последняя опускается на микроструктуру и начинает испаряться на ней, имея характерный контакт (контактную площадку), эффективный радиус которой можно найти, приравнявая капиллярные силы и вес капли

$$R_{eff} = (3V_d / 4\pi)^{2/3} / (\sigma / \rho_l g) \quad (10)$$

где V_d - объем капли, σ - поверхностное натяжение. Проницаемость k определяется соотношением $k = 2\varepsilon \varphi^2 / f \cdot Re$, где φ - форм-фактор мезоструктуры, $f \cdot Re$ - коэффициент трения пара в мезоструктуре, который можно найти из эмпирических корреляций в форме $f \cdot Re = 14 + 10 \exp(-3\langle D \rangle / \delta)$, где $\langle D \rangle$ - средний размер элементов мезоструктуры (например, средний диаметр микросфер в нашем случае).

Для определения скорости испарения в отсутствие режима Лейденфроста запишем соотношение для изменения объема

$$V(t) = V_0 - \int_0^t A_{eff} \frac{d\tilde{\delta}}{dt} dt \quad (11)$$

где $\tilde{\delta}$ - толщина слоя испарения в жидкой капле, A_{eff} - эффективная поверхность контакта капли и мезоструктуры. Скорость испарения можно найти из соотношения

$$\rho_l L \frac{d\tilde{\delta}}{dt} = \frac{\lambda_v^{eff} \alpha_{sv}^{eff} (T_s - T_v)}{\lambda_v^{eff} + \delta_{eff} \alpha_{sv}^{eff}} \quad (12)$$

где λ_v^{eff} , α_{sv}^{eff} - эффективная теплопроводность пара и мезоструктуры и эффективный коэффициент теплоотдачи между нагретой стенкой и паром, T_v - температура испарения. При $\delta_{eff} \rightarrow 0$ имеем

$$\rho_l L \frac{d\tilde{\delta}}{dt} = \frac{\alpha_{sv}^{eff} (T_s - T_v)}{\rho_l L_v} \quad (13)$$

На основе изложенной модели был также проведен расчет критериев и областей срыва режима Лейденфроста, а также вычислена скорость испарения капель жидкостей на мезоструктуре в случае срыва эффекта Лейденфроста (рис.11). Здесь также наблюдается приемлемое согласие с экспериментальными результатами для изооктана на мезоскопических поверхностях на основе углеродных микросфер.

В других предельных случаях нулевой пористости (сплошная подложка) или малой проницаемости скорость пара становится чрезвычайно малой и

давление пара падает до нуля, что и отвечает подавлению эффекта Лейденфроста.

Таким образом, на основе приведенной выше простой модели парения капель в явлении Лейденфроста за счет механизма вязкого течения паровой пленки под каплей, можно вычислить основные параметры процесса – динамику радиуса (следовательно, объема) капель, толщину пленки пара, а также время жизни капли над перегретой поверхностью.

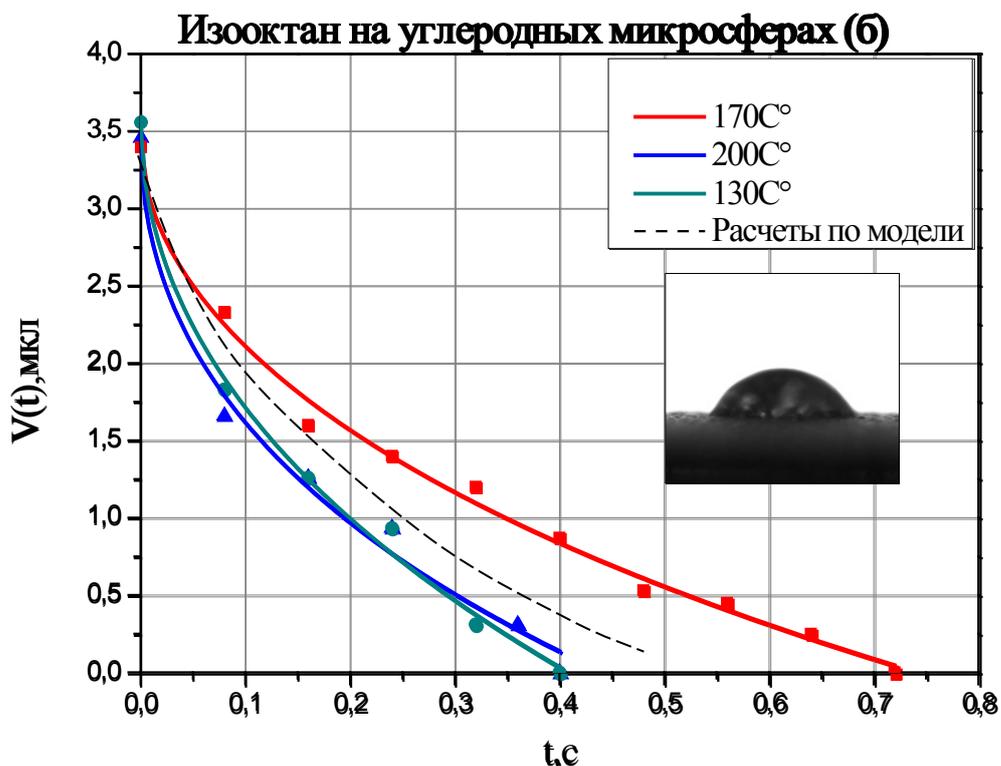


Рис.11. Изменение со временем объема капли изооктана на никелевой подложке с подавлением эффекта Лейденфроста на углеродных микросферах

Из приведенной выше модели видно, что в случае отсутствия вязкого течения пленки пара под каплей, пропадает и сила, поддерживающая каплю в состоянии левитации (парения). В частности, если при испарении капли внутрь структуры, например, мезоскопической, пар может уходить через поровую структуру внутри слоя (например, микрочастиц, как в экспериментах, рассмотренных ниже), то паровая подушка вязкого течения пара существенно уменьшится и даже может практически исчезнуть, что приведет к подавлению явления Лейденфроста. Именно на этом эффекте и основаны результаты приведенных выше экспериментальных исследований по подавлению эффекта Лейденфроста в мезоскопических структурах.

Эксперименты по кипению на подложках наноструктурированного оксида алюминия Al_2O_3 , в интервале температур 160-250°C показали, что наблюдается взрывное вскипание капель воды с образованием множества вторичных капель малого диаметра (порядка $t_v \approx d \approx 0.01$ мм) (рис.12). При этом капля объемом 5 мкл исчезает за $t_v \approx 0.1$ сек. Судя по всему, основная масса

жидкости уносятся с каплями, так как при кипении на проницаемых подложках характерные времена испарения капель воды составляют около $t_v \approx 5$ сек.

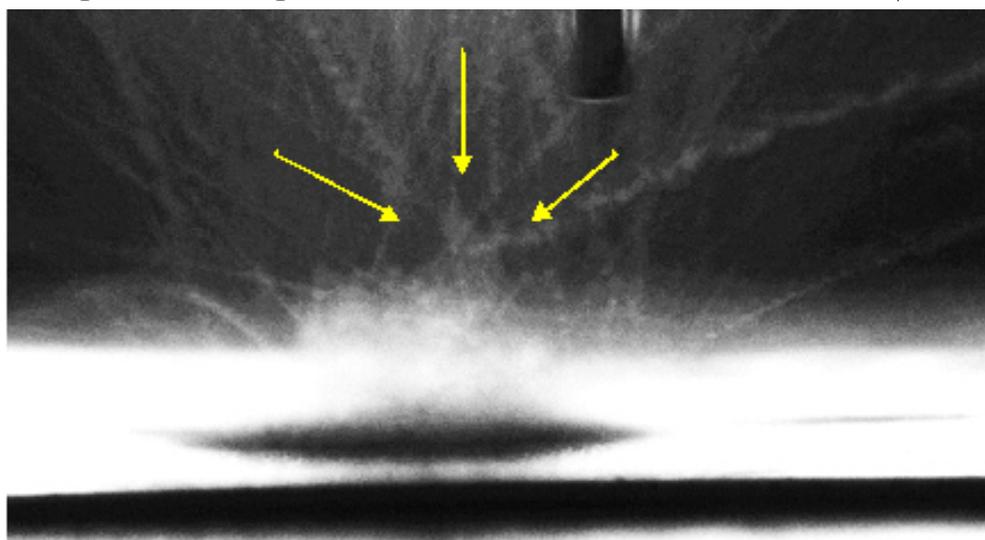


Рис.12. Детальный снимок процесса испарения капель воды на подложке наноструктурированного оксида алюминия Al_2O_3 (температура подложки $250^\circ C$; видны следы от большого количества отделившихся мелких капель – показы стрелками)

Таким образом, в данной работе описаны новые механизмы подавления эффекта Лейденфроста на мезоскопических и наноструктурированных поверхностях. Среди важных факторов, влияющих на поведение капель на перегретой поверхности в описанных ситуациях следует отметить: снижение температуры Лейденфроста, влияние геометрии мезоструктуры на левитацию капель и некоторые другие. Развита в работе модель подавления эффекта Лейденфроста хорошо описывает исследованные случаи поведения капель в условиях сложной поверхности. Вместе с тем изученные явления требуют дальнейшего экспериментального и теоретического исследования, поскольку они чрезвычайно важны для изучения взаимодействия капель рабочих жидкостей с поверхностями энергетического оборудования.

В заключении сформулированы общие выводы по работе:

1. Разработан экспериментальный комплекс для исследования смачиваемости и измерения контактных углов на гладких, мезоскопических и наноструктурированных поверхностях.
2. Создан экспериментальный стенд для изучения процессов испарения и кипения капель различных жидкостей, включающий сменные подложки, управляемый нагреватель подложек, контактный цифровой измеритель температур и термовизионную камеры инфракрасного диапазоны высокого разрешения; подготовлены рабочие жидкости (деионизованная чистая вода, этиловый спирт и изооктан)

3. Изготовлены гладкие подложки из латуни, алюминия и других металлов, изготовлены подложки с мезоскопическими структурами на основе углеродных и металлических микросфер (диаметры микросфер от 7 до 300 мкм); изготовлены подложки наномасштабных поверхностей из нанопористого оксида алюминия.

4. Проведены исследования структур подложек на сканирующем электронном микроскопе TESCAN MIRA3.

5. Исследованы режимы испарения и кипения ограниченных объемов жидкостей с различными теплофизическими параметрами (вода, этиловый спирт и изооктан).

6. Получены температуры Лейденфроста для различных жидкостей для разных поверхностей нагрева.

7. Впервые исследованы особенности теплообмена на мезоструктурных поверхностях и выяснено, что на них проявляется нарушение эффекта Лейденфроста из-за специфического механизма отвода пара через мезоструктуру. Измерены температуры Лейденфроста для рабочих жидкостей и исследованных поверхностей нагрева.

8. Впервые изучены особенности поведения капель на перегретых выше температуры кипения поверхностях нанопористого оксида алюминия и показано, что на них наблюдаются неустойчивости и срыв режима Лейденфроста в режим взрывного вскипания.

9. Построена карта режимов поведения капель на поверхностях нанопористого оксида алюминия.

10. Исследовано влияние мезоскопических направленных дефектов подложки (например, царапин) на процессы кипения капель в режиме Лейденфроста. Показано, что на подобных поверхностях также наблюдается нарушение устойчивости режима Лейденфроста.

11. Построены модели испарения капель с гладких и морфологически сложных поверхностей нагрева, проведены расчеты времени испарения капель на таких подложках.

12. Предложен механизм, разработана модель и проведены вычисления особенностей теплообмена при срыве режима Лейденфроста на мезоскопических поверхностях.

Предложено качественное объяснение взрывному вскипанию капель жидкостей на наноструктурированных поверхностях на базе нанопористого оксидированного алюминия, которое основано на специфических наномасштабных факторах – резкому росту давления пара в нанопорах, если капли находятся в режиме Касси-Бакстера или механизму радиационного переноса тепла в ближней зоне.

Публикации по теме диссертации

1. А.С. Дмитриев, А.С. Романов. Особенности теплообмена при взаимодействии капель рабочих жидкостей с мезоскопическими и наномасштабными поверхностями энергетического оборудования. Вестник МЭИ. № 2, с. 1-14. 2013.
2. А.С. Дмитриев, А.С. Романов. Особенности теплообмена при взаимодействии капель рабочих жидкостей с мезоскопическими и наномасштабными поверхностями энергетического оборудования. «Повышение эффективности энергетического оборудования - 2012», 13–15 ноября 2012 г. Санкт-Петербург. с. 560-571.
3. А.С. Дмитриев, А.С. Романов. Об инфракрасной микроскопии высокого разрешения для изучения переноса тепла в нанопокртыях и нанокompозитах. XXII Международная научно-техническая конференция, школа молодых специалистов и выставка по фотоэлектронике и приборам ночного видения 22-25 мая 2012 Москва, Россия.
4. А.С. Дмитриев, А.С. Романов. Явление подавления эффекта Лейденфроста на подложках с покрытием из микросфер. 19-я Межд. научн.-техн. конф. студентов и аспирантов. Радиотехника, электроника и энергетика. М. Изд. Дом МЭИ. 2013. с.65.
5. А.С. Дмитриев, А.С. Романов. Теплофизические проблемы наноэнергетики и наноэлектроники. Эффект Лейденфроста. 10 Международная конференция «Актуальные вопросы теплофизики и физической гидрогазодинамики», 17-23 сентября 2012, Алушта.
6. А.С. Дмитриев, А.С. Романов. Особенности теплообмена при взаимодействии капель рабочих жидкостей с мезоскопическими и наномасштабными поверхностями энергетического оборудования. ОМИП-2013. М. МЭИ. С. 67-69. 2013.

Печ.л. _____

Тираж _____

Заказ _____