



УДК 535.8:536.4

Дмитриев А.С., Романов А.С.

Национальный исследовательский университет  
«Московский энергетический институт», Россия,  
111250, Москва, Красноказарменная ул., 14, E-mail: asdmitriev@mail.ru

## ОПТИЧЕСКИЕ И ИНФРАКРАСНЫЕ МЕТОДЫ ИЗУЧЕНИЯ КАРТЫ РЕЖИМОВ В ЭФФЕКТЕ ЛЕЙДЕНФРОСТА

### АННОТАЦИЯ

В работе исследован эффект Лейденфроста - важное явление, которое часто ограничивает тепловой поток от сильно перегретых поверхностей к каплям жидкости [1-6]. При исследовании кипения капля на подложках, покрытых неупорядоченными углеродными микросферами, был обнаружен срыв эффекта Лейденфроста. Основные методы исследования явления срыва минимального теплового потока (Лейденфрост-эффект) – высокоскоростная съемка и инфракрасная камера высокого разрешения. Были исследованы зависимости времени испарения каплей для различных жидкостей при разных температурах подложек. Представлена модель срыва эффекта Лейденфроста, основанная на механизме «срыва» паровой подушки под каплей внутри мезоскопической структуры подложки.

ЭФФЕКТ ЛЕЙДЕНФРОСТА, ОПТИЧЕСКИЕ И ИНФРАКРАСНЫЕ МЕТОДЫ,  
МЕЗОСКОПИЧЕСКАЯ СТРУКТУРА, ЖИДКАЯ КАПЛЯ, ПЕРЕГРЕТАЯ ПОВЕРХНОСТЬ

### ВВЕДЕНИЕ

В работе исследованы новые поверхности нагрева на базе мезоскопических и наноструктурных морфологий – слои микросфер диаметром от 7 мкм (микросферы чистого углерода, полученные оплавлением леса углеродных нанотрубок), мезоскопические структуры монодисперсных сфер металлов и сплавов диаметром от 50 до 300 мкм, а также нанопористые слои оксида алюминия. Генерация, наблюдение и измерения времени испарения каплей производилось на гониометре EasyDrop фирмы Kruss; проведено изучение таких поверхностей методом сканирующей электронной микроскопии и получены фотографии микрорельефа и профили поверхностей (рис.1).

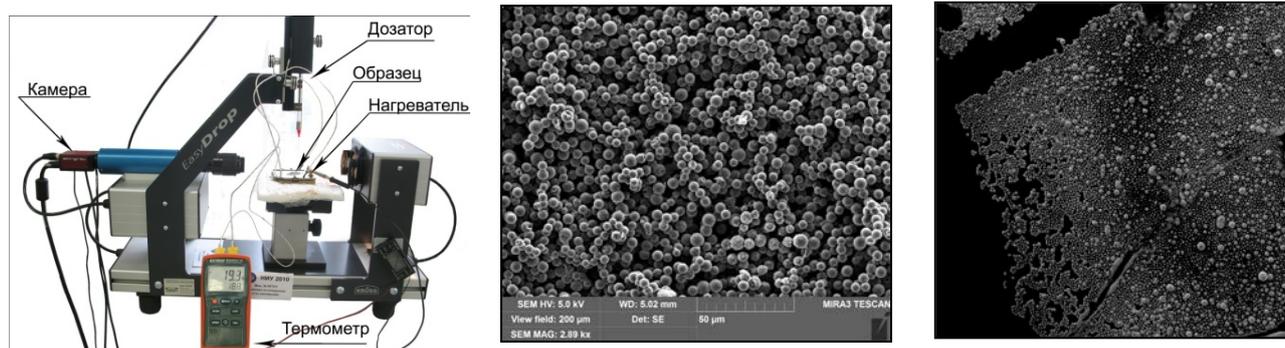


Рис.1. Общий вид установки и подложек

Данный гониометр оснащается системой для автоматического дозирования капель с высокой точностью. Объем капель во всех экспериментах составлял 5 мкл.

## ОПТИЧЕСКИЕ ИЗМЕРЕНИЯ И РЕЗУЛЬТАТЫ

В качестве методики изучения процессов использовались оптические изображения, полученные на установке EasyDrop. Обработка оптических изображений проводилась способами, описанными ниже.

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. Погрешности измерения объема капель зависят от разрешения снимка и от четкости изображения капли, что определяет границу капли на снимке. Оценка погрешности измерения объема капель проводилась по следующей методике: проводились две границы капли – первая по наименее различимым пикселям на поверхности капли, вторая по наиболее темным граничным пикселям.

Погрешность измерения температуры. Измерения температуры проводились в непосредственном контакте термопары прибора с поверхностями образцов. Провода термопары имели толстый слой тканной изоляции, что минимизировало отвод тепла от спая термопары в окружающую среду и снижало ошибку измерений. Оценка погрешности измерений проводилась при помощи одновременного измерения температуры поверхности нагревателя двумя термопарами, провода одной из них располагалась вдоль изотермической поверхности нагрева, провода другой термопары располагались нормально к поверхности.

### Измерения углов смачивания

Начальной задачей исследований было получение данных по контактному углу на тех подложках, которые далее использовались для изучения процессов испарения и кипения капель. Измеренные углы смачивания подложек различными жидкостями в интервале температур от комнатной (20°C) до температуры ниже температуры кипения жидкости представлены в таблице 1.

Таблица 1. Краевые углы смачивания различных подложек рабочими жидкостями при температурах ниже температуры кипения

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 

Анализ полученных результатов показывает, что для воды на различных подложках с мезоструктурой из микросфер диаметром 50-300 мкм контактные углы лежат в диапазоне 84-118<sup>0</sup> (для температуры подложки  $T_s = 21^{\circ}C$ ) и в диапазоне 80-90<sup>0</sup> (для температуры подложки  $T_s = 45^{\circ}C$ ). Наблюдается некоторое уменьшение контактного угла с ростом температуры поверхности. В случае мезоструктур из углеродных микросфер контактный угол выявляет сильные гидрофобные свойства такой поверхности и лежит в диапазоне 126-129<sup>0</sup>.

Таблица 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 20 мкм	71±5°	10±2°	~0°
Анодированный алюминий ALOX; толщина 100 мкм	75±5°	11±2°	~0°
Анодированный алюминий ALOX; взрывное вскипание	68±5°	7±2°	~0°

Из таблицы 2 видно, что крупнопористый анодный слой алюминия является гидрофобным по отношению к воде, а так же имеет наибольший угол смачивания для спирта из всех представленных подложек ~18°. Остальные подложки из анодированного алюминия имеют угол смачивания для воды в диапазоне от 68-75° и от 7° до 11° для спирта. Для изооктана все подложки являются хорошо смачиваемыми. Контактный угол стремится к 0°.

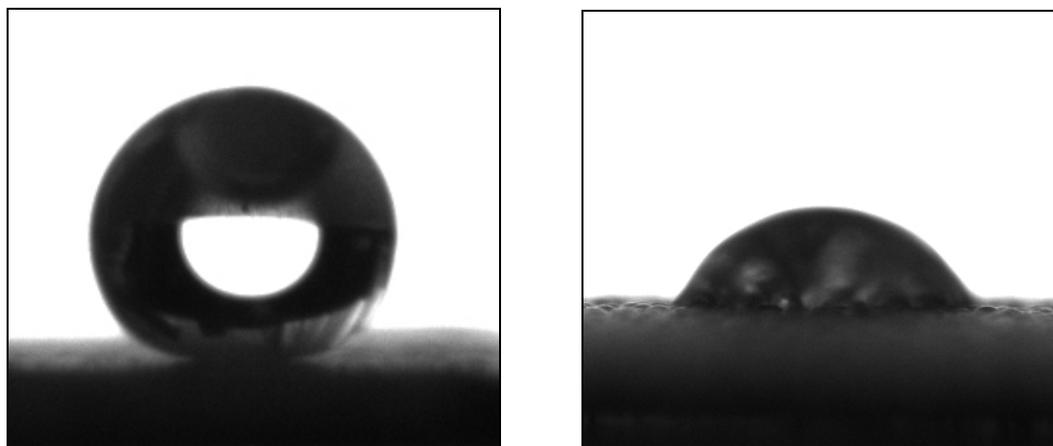


Рис. 2. Изображения испаряющей капли, левитирующей над никелевой пластиной без покрытия в режиме Лейденфроста (а) и испаряющейся капли с поверхности пластины, покрытой металлическими сферами (б)

### Кипение и испарение капель

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 металлическими сферами (в качестве примера, из свинца - рис.2).

На гладких подложках не наблюдалось отклонения полученных результатов от ранее известных. Капли при достижении подложкой критической температуры переходили в

плёночный режим кипения. Время испарения составляло десятки и сотни секунд, в зависимости от жидкости (рис.3).

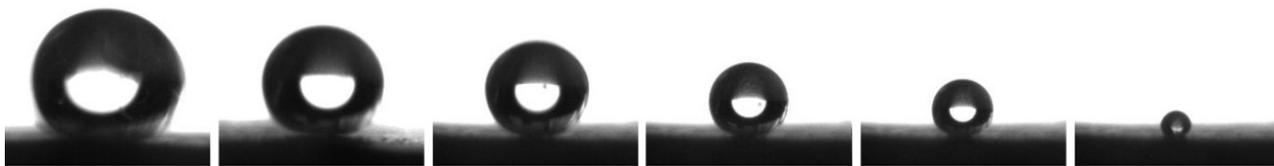


Рис. 3. Капля воды на чистой никелевой пластинке – эффект Лейденфроста;  $T=240^{\circ}\text{C}$ ; время испарения более 100 сек

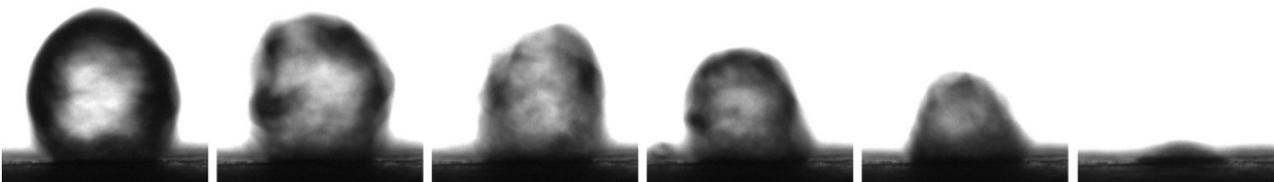


Рис. 4. Капля воды на подложке с покрытием из углеродных микросфер – подавление эффекта Лейденфроста;  $T=240^{\circ}\text{C}$ ; время испарения 7 сек

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

Зависимость времени испарения капель воды от температуры подложки с покрытием из углеродных микросфер представлена на рис.5. При дальнейшем увеличении температуры (выше точки Лейденфроста) время испарения изменяется незначительно и составляет примерно  $t\sim 7$ сек.

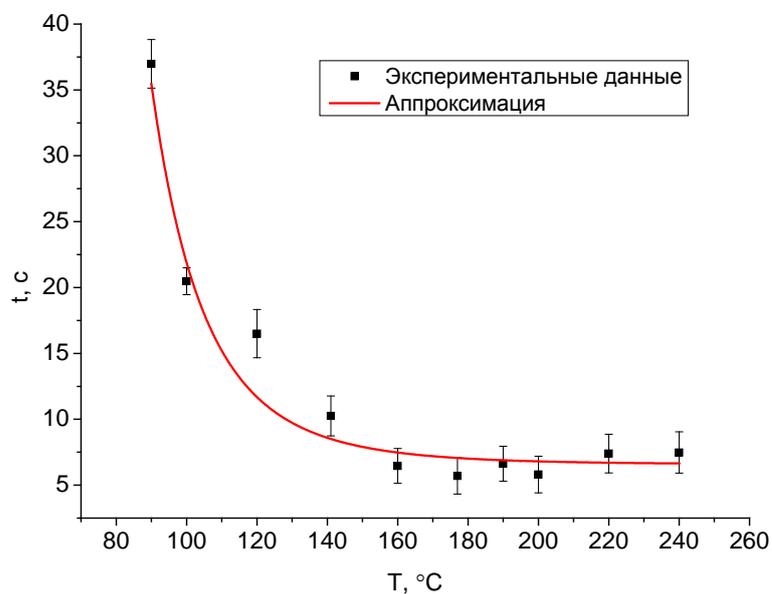


Рис. 5. График зависимости времени испарения капель воды от температуры поверхности на подложке из углеродных микросфер

Полученные данные подтверждают тот факт, что на рассматриваемых здесь подложках из углеродных микросфер испарение идет достаточно длительное время, но все-таки не отвечает режиму левитации капель над пленкой пара. Следует особо подчеркнуть, что поскольку в этих экспериментах доля растворенного воздуха не фиксировалась, то последний мог оказывать определенное влияние на процессы испарения.

При развитии процесса и постепенном уменьшении объема капли, происходит накопление пузырьков вблизи ее вершины с образованием большой паровой полости, которая в конце процесса выкипания капли взрывается. Пока не удалось установить роль углеродных микросфер в процессе формирования газовых и паровых пузырьков, что связано с необходимостью более высокоскоростной съемки процессов испарения и закипания.

При температуре  $T_s \approx 140^\circ\text{C}$  время кипения капли сокращается почти в три раза по сравнению с температурой  $T_s \approx 120^\circ\text{C}$ . Уже через  $t \approx 1,5$  сек после контакта капли с поверхностью, происходит заполнение всего объема мелкими пузырьками, которые периодически выходят наружу, при этом поверхность капли не является гладкой и возмущена их выходом. При повышении температуры до  $T_s \approx 160^\circ\text{C}$  время кипения капли несколько увеличивается. Повышается угол смачивания капли и процесс нагрева жидкости до температуры кипения несколько замедляется. Начало кипения не сопровождается активным образованием центров кипения, вместо этого, в центре капли начинает образовываться большой пузырек пара, достигающий значительных объемов, сопоставимых с объемом самой капли.

При дальнейшем развитии процесса, в месте оставшегося контакта жидкости с подложкой зарождаются центры парообразования и происходит резкий рост объема капли за счет пара внутри нее. Затем пар начинает выходить наружу существенно возмущая поверхность капли, что приводит к редкому отрыву более мелких капель с ее поверхности. Суммарное число оторвавшихся капель наблюдаемых в опытах составляло до трех штук. При уменьшении объема исходной капли, процесс кипения происходит более спокойно.

При температуре  $T_s \approx 240^\circ\text{C}$  поведение капли слабо отличается от кипения при более низких температурах ( $T_s \approx 190^\circ\text{C}$ ), за исключением того, что наблюдается меньшее число оторвавшихся сателлитов и меньше время их испарения.

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

Таблица 3. Обобщенное поведение ограниченных объемов жидкостей на перегретой поверхности

Образец	Режим испарения	Жидкость/время испарения
1. Чистая Ni пластинка	Лейденфрост	1.1 Вода/ >100 с 1.2 Спирт/ 45-65 с 1.3 Изookтан/ 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 Изookтан/ 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 Изookтан/ 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 Изookтан/ 0.5-0.9 с

В настоящее время относительно температуры Лейденфроста нет окончательной теоретической модели. В некоторых работах в качестве  $T_L$  принимают, что некоторую характерную температуру как теплофизическое свойство жидкости и считают, что она соответствует спинодали или максимальной температуре перегрева. Если использовать условие механической стабильности термодинамической системы  $(\partial p / \partial V)_T = 0$  и уравнение

Ван дер Ваальса для жидкости, то ниже критического давления ( $p < p_c$ ) можно получить выражение  $T_L \approx (27/32)T_c$  ( $T_c$  - критическая температура жидкости).

Указанный критерий для  $T_L$  был обобщен для учета теплофизических свойств поверхности нагрева и свойств смачиваемости жидкости Баумайстером

$$T_L = T_i + \frac{(27/32)T_c \left\{ 1 - \exp \left\{ -0,016 \left[ (\rho_s / A_s)^{4/3} / \sigma \right]^{1/3} \right\} \right\} - T_i}{\exp \left( 3,066 \cdot 10^6 / \lambda_s \rho_s C_p^s \right) \operatorname{erf} \left( 1758 / \sqrt{\lambda_s \rho_s C_p^s} \right)} \quad (1)$$

$\sigma$  - поверхностное натяжение на границе жидкость-пар,  $\lambda_s, \rho_s, C_p^s$  - соответственно теплопроводность, плотность и удельная теплоемкость материала подложки,  $A_s$  - атомный вес материала подложки,  $T_i$  - температура жидкости. Нами были рассчитаны температуры Лейденфроста для спирта и изооктана на никелевой подложке и проведено сравнение с опытными данными, которое показало вполне приемлемое согласие [3,4].

## ИНФРАКРАСНЫЕ ИЗМЕРЕНИЯ ДИНАМИКИ ИСПАРЕНИЯ И КИПЕНИЯ

Использование инфракрасной камеры высокого разрешения позволяет провести исследования взаимодействия и теплообмена капель жидкости с подложкой и получить представления о характере тепловых полей, возникающих при этом.

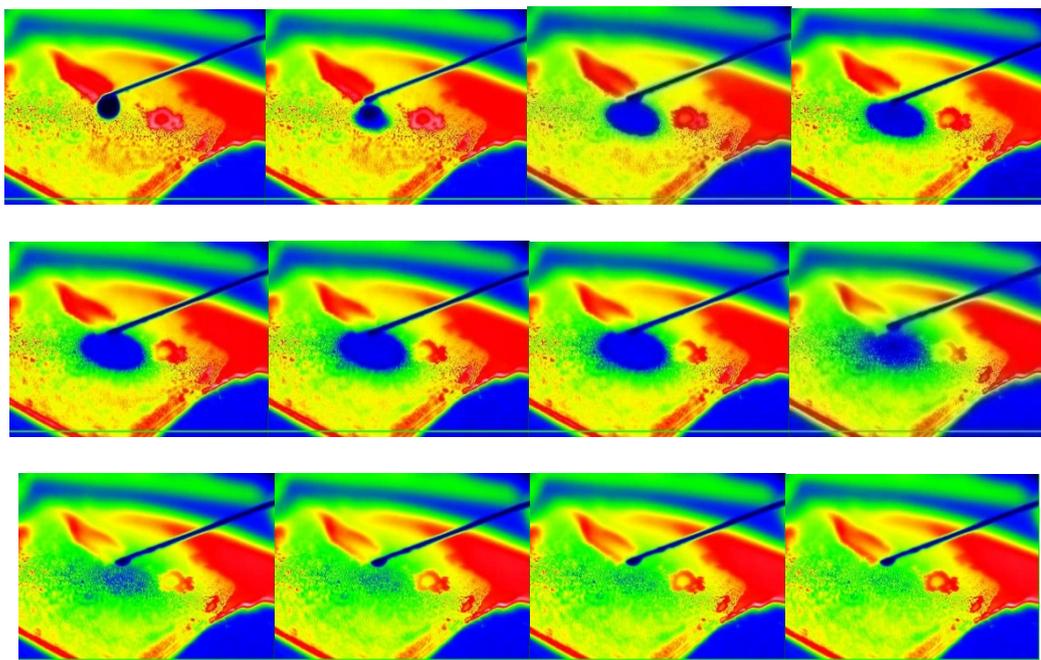


Рис. 6. Термовидеокадры падения капель воды на подложку из латунных микросфер с температурой 150°C

Для получения инфракрасной картины тепловых полей в данной работе была использована термовизионная камера высокого разрешения Artcam-320. С ее помощью удалось получить большое число фотографий и видеоизображений в инфракрасной части спектра, которые значительно расширяют информацию о процессах, протекающих при взаимодействии капель жидкостей с перегретой подложкой.

В частности, на рис.6 представлены термовидеокадры падения капель воды на подложку из латунных микросфер, температурой которой близка к 150°C. Здесь и далее,

временные интервалы между снимками составляют несколько сотен мсек. Хорошо видно, что в этом режиме капля, попавшая на подложку, не принимает сфероидального состояния, а весьма быстро происходит процесс быстрого испарения (пузырькового кипения) в области до температуры Лейденфроста (в этом случае оценки дают, что для латуни  $T_L \approx 150-160^\circ\text{C}$ ).

На рис.7 показаны инфракрасные изображения падения капель воды на мезоскопическую подложку из углеродных микросфер (температура  $150^\circ\text{C}$ ). Здесь также видно, что капля не переходит в режим Лейденфроста, хотя температура около  $T_L \approx 150^\circ\text{C}$ . Также из изображений видно, что кроме капли видна область охлаждения поверхности за счет проникания пара капли внутрь мезоскопической структуры. Помимо этого видны микрокапли или паровые пузыри (диаметром сотни мкм), которые выбрасывает капля (они показаны стрелками).

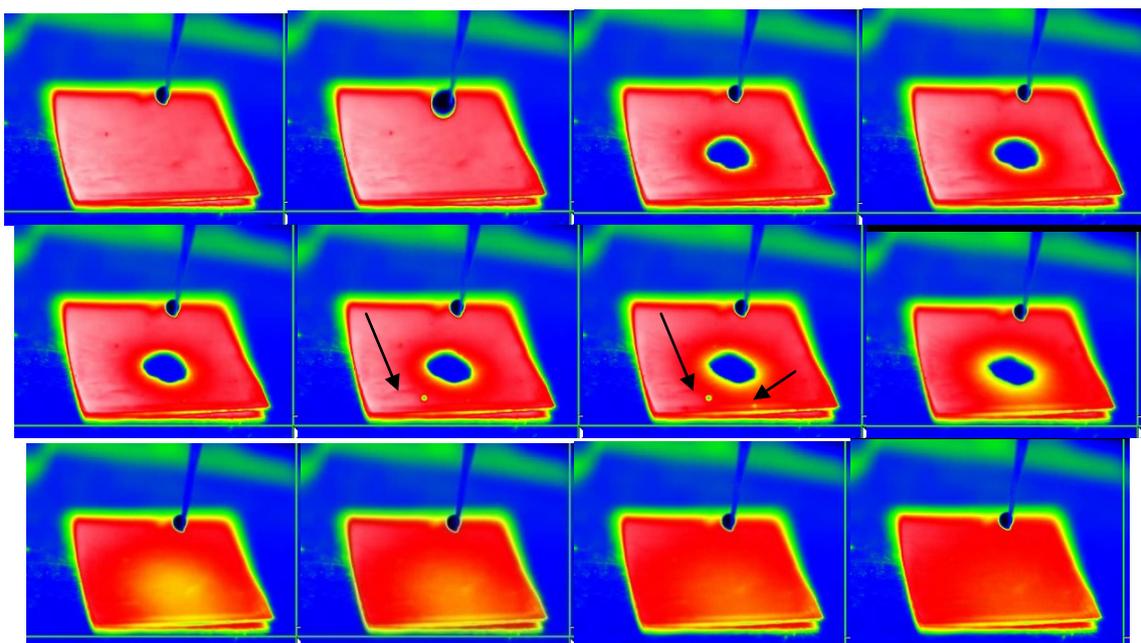


Рис. 7. Инфракрасные изображения падения капель воды на мезоскопическую подложку из углеродных микросфер (температура  $150^\circ\text{C}$ )

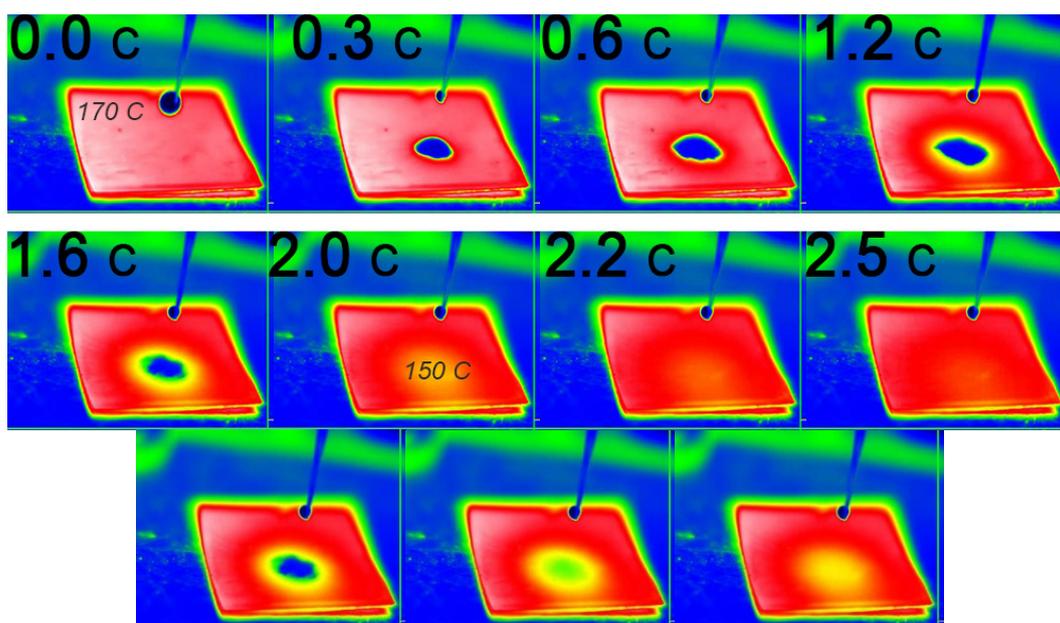


Рис. 8. Инфракрасные изображения падения капель воды на мезоскопическую подложку из углеродных микросфер (температура  $170^\circ\text{C}$ ); на трех нижних изображениях показана динамика теплообмена за время от 1,6 сек до 1,9 сек

При детальном изучении инфракрасной картины видно, что в отдельные моменты времени число микрокапель на поверхности достаточно велико, что говорит об отсутствии эффекта Лейденфроста и генерации капель, по-видимому, за счет пузырькового кипения.

На рис.8 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.

## КИПЕНИЕ И НЕУСТОЙЧИВОСТЬ РЕЖИМА ЛЕЙДЕНФРОСТА НА НАНОСТРУКТУРНОЙ ПОВЕРХНОСТИ ОКСИДА АЛЮМИНИЯ

Изучение процессов испарения и кипения на наноструктурированных поверхностях, в настоящее время привлекает особое внимание в связи с многочисленными интересными явлениями и возможными перспективными приложениями. В данной работе проводилось изучение различных наноструктурированных поверхностей на основе подложек из нанопористого оксидированного алюминия, полученных при помощи различных технологий; электронная сканирующая микроскопия некоторых из таких поверхностей показана на рис. 9.

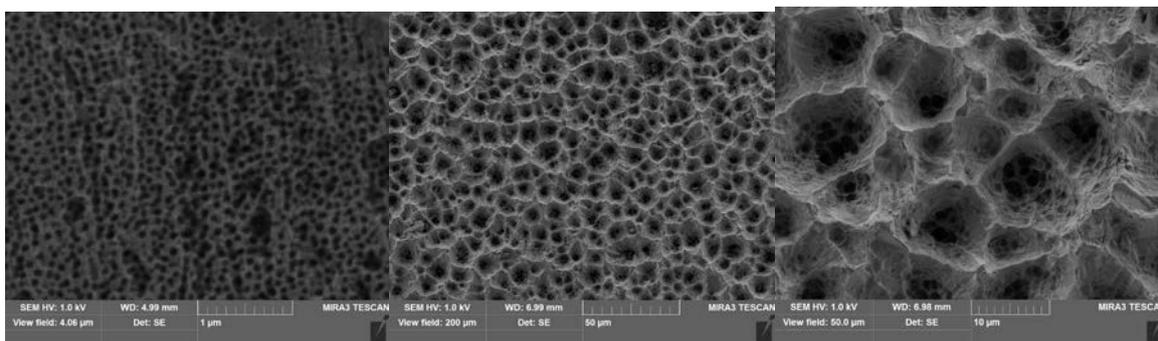


Рис. 9. Примеры изображений сканирующей электронной микроскопии нанопористого оксидированного алюминия (слева – размер пор – 80-100 нм, в центре – 5-10 мкм; справа – сильно увеличенное изображение)

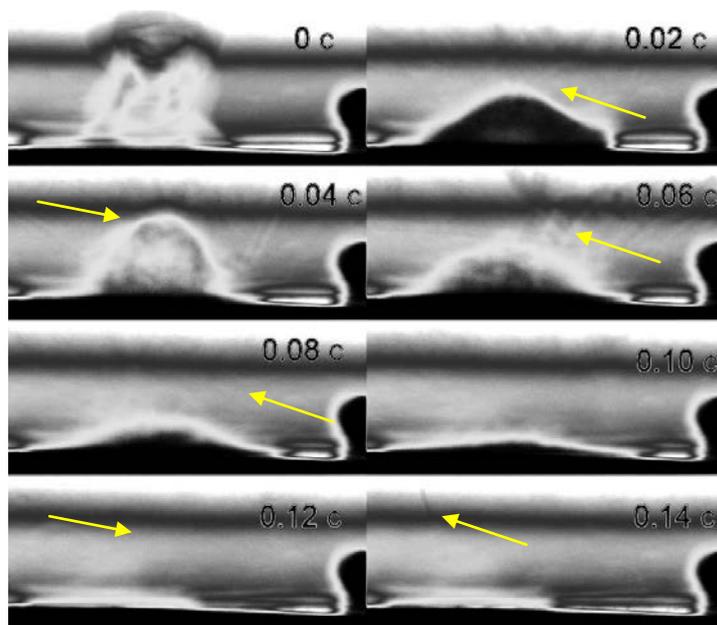


Рис. 10. Динамика испарения каплей воды с алюминиевой подложки покрытой оксидом алюминия  $\text{Al}_2\text{O}_3$  (температура подложки  $250^\circ\text{C}$ )

Как показали эксперименты по кипению на алюминиевых пластинках, покрытых специально выращенной оксидной пленкой, в интервале температур 160-250°C наблюдается взрывное вскипание капель воды с образованием множества вторичных капель малого диаметра (порядка  $t_v \approx d \approx 0,01$  мм) (рис.10). При этом капля объемом 5 мкл исчезает за  $t_v \approx 0,1$ сек. Судя по всему, основная масса жидкости уносится с каплями, так как при кипении на проницаемых подложках характерные времена испарения капель воды составляют около  $t_v \approx 5$  сек.

Наличие мелких капель хорошо видно при детальном анализе изображений (рис.11). Можно заметить большое число разлетающихся мелких капель, а также многочисленные мелкие капли, которые находятся на поверхности нагрева и также быстро испаряются или «улетают» с поверхности. Данные капли показаны стрелками (подобный механизм для очень мелких капель обнаружен и объяснен в работе [6]. Дело в том, что согласно указанной работе, при уменьшении размеров капли при испарении, существует критический размер капли, когда устойчивая левитация капли невозможна и последняя стремится удалиться от поверхности весьма со значительной скоростью.

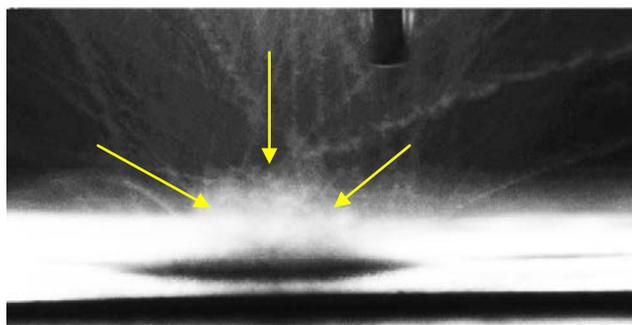


Рис. 11. Детальный снимок в процессе испарения капель воды с алюминиевой подложки покрытой наноструктурированным оксидом алюминия  $Al_2O_3$  (температура подложки 250°C; видны следы от большого количества отделившихся мелких капель – показы стрелками)

Механизм взрывного вскипания на оксиде алюминия пока до конца не ясен. По одной из гипотез, капля воды при контакте с поверхностью оксида алюминия находится в режиме Касси-Бакстера и имеет контакт только на вершинах рельефа образующего поры (рис.12). При этом образуются замкнутые полости ограниченные стенками пор и каплей сверху. Поры аппроксимируются кубами со стороной 100 нм, что является характерным размером для оксидных пленок алюминия. Объем одной поры составляет при этом около  $10^{-21} м^3$ .

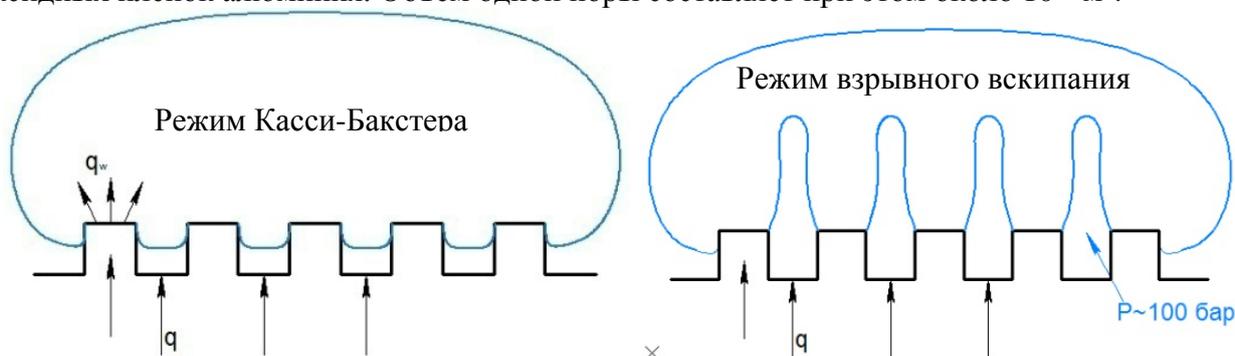


Рис. 12. Возможная модель образования вторичных капель при кипении воды на подложке из оксида алюминия в процессе взрывного вскипания

Считается, что теплота подводится только с нижней части куба, а остальные его стенки являются изолированными (рис.12а). Расчеты показывают, что при изохорном подводе теплоты внутрь такого объема за малый промежуток времени возможное нарастание давления пара внутри этой полости составляет до  $p \approx 100$  бар за время составляющее единицы миллисекунд. Такое давление вполне способно вызвать возмущения в капле приводящее к ее разрыву и отрыву от нее более мелких капель (механизм «парового ножа») (рис.12б).

При попытке воспроизведения условий классического режима Лейденфроста для оценки правильности методики измерений на поверхности чистого алюминия, было обнаружено, что дефекты поверхности влияют на устойчивость режима. На рис.13 представлены режимы влияния дефектов на поведения капель.

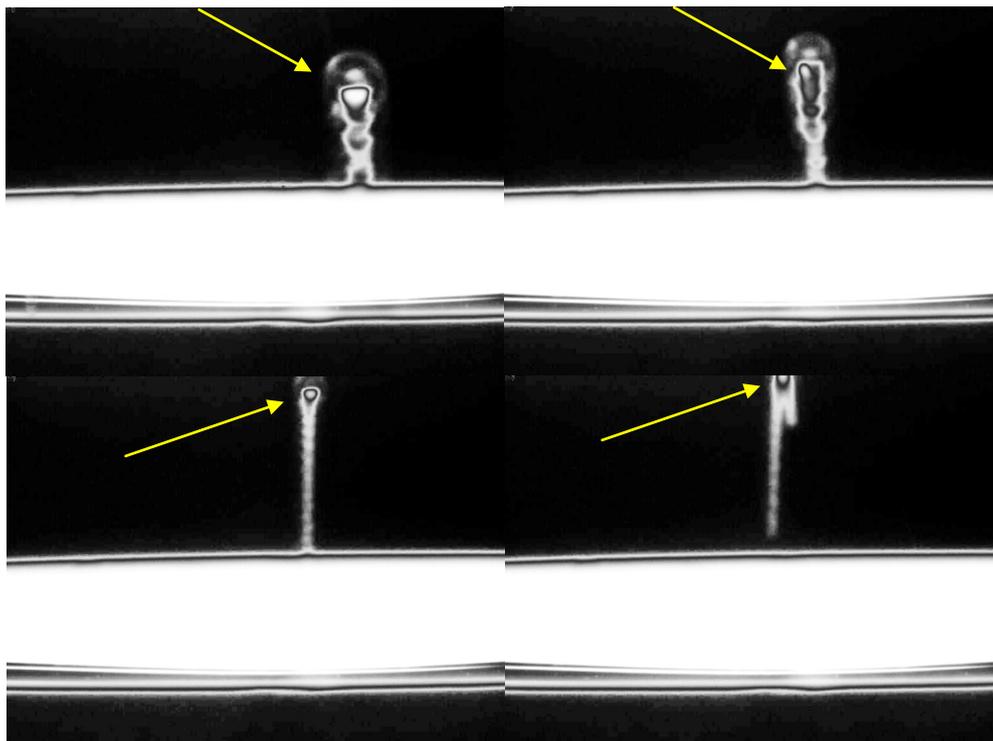


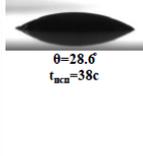
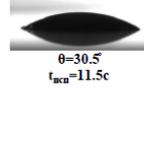
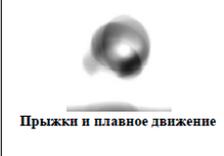
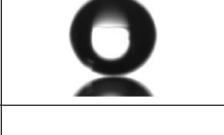
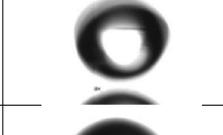
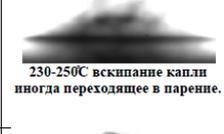
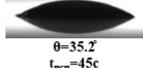
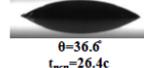
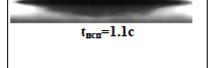
Рис. 13. Снимки неустойчивого режима Лейденфроста на вогнутой поверхности круга; на фотографиях белая область – вогнутая поверхность круга (видна сама подпрыгивающая капля; температура поверхности –  $180^{\circ}\text{C}$ ; на двух нижних снимках видна большая (~20мм) высота полета капли меньшего размера над поверхностью)

В качестве образца использовался дюралевый круг с вогнутой поверхностью. Сама поверхность круга после проточки доводилась наждачной бумагой. В результате получилась шероховатая поверхность. Оказалось, что в отличие от относительно гладких поверхностей, режим Лейденфроста на такой поверхности теряет свою устойчивость. Капля в начальный момент времени, когда масса ее велика, ведет себя подобно классическому случаю. С постепенным испарением капли и уменьшением ее массы, капля начинает подпрыгивать над поверхностью с амплитудой обратно пропорциональной ее массе (движение капли показано стрелкой; из-за слишком большой выдержки капля кажется размазанной) (рис.13). Подобный механизм формирования капель в режиме Лейденфроста недавно был описан в литературе [6].

Карта режимов для кипения на пластинах с покрытием из нанопористого оксида алюминия  $\text{Al}_2\text{O}_3$  приведена в таблице 4. Видно, что в зависимости от толщины покрытия и температуры могут иметь место весьма разнообразные варианты поведения капель на нанопористых подложках. Эти режимы богаче тех, что проявляются на пористых или гладких поверхностях нагрева. В главе 4 проведено теоретическое исследование, построены

модели и выполнены расчеты, объясняющие механизмы и особенности теплообмена, которые экспериментально исследованы в настоящей главе.

Таблица 3.4. Сравнение режимов кипения на пластинах с покрытием из нанопористого оксида алюминия  $Al_2O_3$

Толщина) Температура	60С	70С	100С	180С	230С	250С
20 мкм	 $\theta=28.6$ $\tau_{исп}=38с$	 $\theta=30.5$ $\tau_{исп}=11.5с$	 кипение $\tau_{исп}=1.1с$	 прыгающая капля (150-215С) $\tau_{исп}=1.1с$	 Прыжки и плавное движение $\tau_{исп}=1.1с$	-
40 мкм	Аналогично 20 мкм	Аналогично 20 мкм	кипение	180С Кипение 190С Плавное движение в режиме ЛФ		-
60 мкм	Аналогично 20 мкм	Аналогично 20 мкм	кипение	Ниже 230С – режим кипения		
80 мкм	-	-	-	-	 230-250С вскипание капли иногда переходящее в парение.	 Режим Лейденфроста
100 мкм	 $\theta=35.2$ $\tau_{исп}=45с$	 $\theta=36.6$ $\tau_{исп}=26.4с$	 $\tau_{исп}=1.1с$			Кипение

## МОДЕЛЬ СРЫВА РЕЖИМА ЛЕЙДЕНФРОСТА

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.

В первом варианте капля в определенных ситуациях может «садиться» на контактные площадки мезоструктуры, т.е. иметь прямой частичный контакт с перегретой выше температуры Лейденфроста поверхностью. Другой режим, который впервые наблюдался в данной работе имеет место для мезоскопических структур и имеет другие особенности. Роль контакта между каплей и структурой менее важен, 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.

В рамках указанной модели запишем уравнение движение пара в двумерном случае, как показано на рис.14.

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

где  $v_r$  - скорость течения пара в радиальном направлении,  $p$  - давление пара,  $\eta$  - вязкость пара,  $\varepsilon, k$  - соответственно пористость и проницаемость мезоскопической поверхности нагрева. Приведенное уравнение позволяет вычислить давление со стороны пара на каплю.

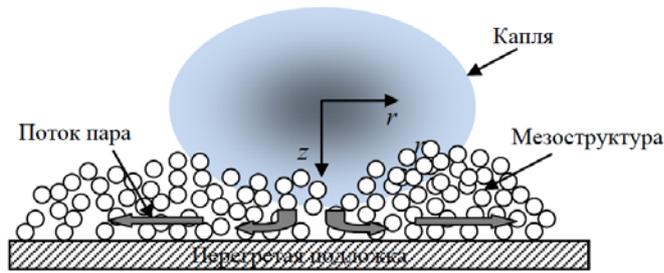


Рис. 14. Схема подавления эффекта Лейденфроста внутри мезоструктуры

Нетрудно видеть, что 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  $\lambda_v$  и мезоструктуру с теплопроводностью  $\lambda_m$ , можно определить из соотношения  $q = \Delta T \lambda_{eff} / \delta$ , где  $\lambda_{eff}$  - эффективная теплопроводность мезоскопической структуры с паром, которую можно определить, например, по соотношению Максвелла  $\lambda_{eff} = \lambda_v \phi + \lambda_m (1 - \phi)$ , где  $\phi$  - объемная доля пара, которая зависит от геометрии мезоструктуры. В случае микросфер эта объемная доля легко вычисляется, зная диаметр микросфер и их геометрическое расположение в микроструктуре (например, см. рис.2). Баланс массы пара при испарении определяется отношением между средней скоростью пара и тепловым потоком

$$\langle v \rangle A_d \rho_v = A_R q / L, \quad (3)$$

где  $\rho_v$  - 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

$$(2\pi r \delta) \langle v \rangle \rho_v = (\pi r^2) q / L. \quad (4)$$

Откуда находим среднюю скорость течения пара

$$\langle v \rangle = \frac{\Delta T \lambda_{eff}}{2\delta^2 L \rho_v} r = gr. \quad (5)$$

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

$$v = (3/2) \langle v \rangle \left[ 1 - 4 \left( \frac{z}{\delta} \right)^2 \right] = (3/2) \left[ 1 - 4 \left( \frac{z}{\delta} \right)^2 \right] gr. \quad (6)$$

Зная  $v$ , нетрудно получить

$$\frac{dv}{dz} = \frac{12g}{\delta^2} rz, \quad \frac{d^2v}{dz^2} = \frac{12g}{\delta^2} r. \quad (7)$$

Откуда получаем выражение для давления пара

$$\frac{dp}{dr} = -\eta g r \left( \frac{12}{\varepsilon \delta^2} + \frac{1}{k} \right). \quad (8)$$

Последнее уравнение нетрудно проинтегрировать, что дает

$$p(r) = p_0 + \frac{\eta g}{2} \left( \frac{12}{\varepsilon \delta^2} + \frac{1}{k} \right) (R_d^2 - r^2) = p_0 + \frac{\eta \Delta T \lambda_{eff}}{4 \delta^2 L \rho_v} \left( \frac{12}{\varepsilon \delta^2} + \frac{1}{k} \right) (R_d^2 - r^2), \quad (9)$$

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

$$F_v = \int_A p dA = \frac{\eta g \pi}{2} \left( \frac{12}{\varepsilon \delta^2} + \frac{1}{k} \right) R_d^4 = \frac{\eta \Delta T \lambda_{eff} \pi}{4 \delta^2 L \rho_v} \left( \frac{12}{\varepsilon \delta^2} + \frac{1}{k} \right) R_d^4. \quad (10)$$

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, приравняв капиллярные силы и вес капли

$$R_{eff} = (3V_d / 4\pi)^{2/3} / (\sigma / \rho_l g), \quad (11)$$

где  $V_d$  - объем капли,  $\sigma$  - поверхностное натяжение. Заметим, что проницаемость  $k$  определяется соотношением  $k = 2\varepsilon \varphi^2 / f \cdot Re$ , где  $\varphi$  - 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).

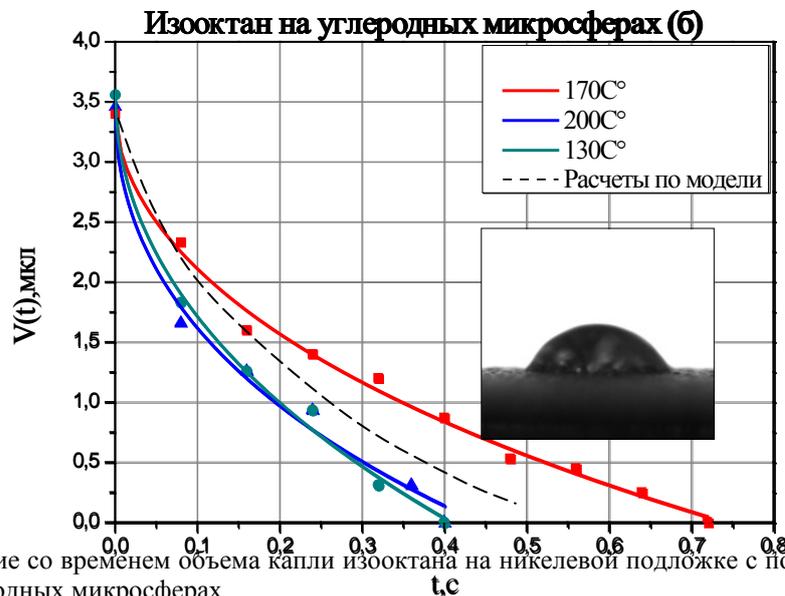


Рис. 15. Изменение со временем объема капли изоктана на никелевой подложке с подавлением эффекта Лейденфроста на углеродных микросферах

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

$$V(t) = V_0 - \int_0^t A_{eff} \frac{d\tilde{\delta}}{dt} dt, \quad (12)$$

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

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

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

$$\rho_l L \frac{d\tilde{\delta}}{dt} = \frac{\alpha_{sv}^{eff} (T_s - T_v)}{\rho_l L_v}. \quad (14)$$

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.15).

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.

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.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, в данной работе описаны новые механизмы срыва 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. Развитая 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.

## СПИСОК ОБОЗНАЧЕНИЙ

$V_d$  - объем капли;

$\sigma$  - поверхностное натяжение;

$\alpha$  – коэффициент теплоотдачи, Вт/(м<sup>2</sup>·К);

$T$  – температура, К;

$\rho_v$  - плотность пара;  $A_d, A_R$  - площади испарения на капле и области передачи тепла;

$L$  - скрытая теплота парообразования;

$v_r$  - скорость течения пара в радиальном направлении;

$p$  - давление пара;

$\eta$  - вязкость пара;

$\varepsilon, k$  - соответственно пористость и проницаемость мезоскопической поверхности нагрева.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Quere D., Ajdari A.** Liquid drops surfing the hot spot. *Nat Mater.* 5:429–430. 2006.
2. **Biance A., Clanet C., Quere D.** Leidenfrost drops. *Phys Fluids.* 15(6):1632–1637. 2003.
3. **Дмитриев А.С., Романов А.С.** Особенности тепломассообмена при взаимодействии капель рабочих жидкостей с мезоскопическими и наномасштабными поверхностями энергетического оборудования. «Повышение эффективности энергетического оборудования - 2012», 13–15 ноября 2012 г., Санкт-Петербург.
4. **Дмитриев А.С., Романов А.С.** Особенности тепломассообмена при взаимодействии капель рабочих жидкостей с мезоскопическими и наномасштабными поверхностями энергетического оборудования. //Вестник МЭИ. № 2. 2013.
5. **Cerro D., Marín Á., Römer G. et. al.** Leidenfrost Point Reduction on Micropatterned Metallic Surfaces. *Langmuir* 2012, 28, 15106–15110.
6. **Celestini F., Frisch T., Pomeau Y.** Take-off of small Leidenfrost droplets. arXiv:1206.5932v2 [cond-mat.soft] 28 Jun 2012.

A.S. Dmitriev, A.S. Romanov

*Nation Research University «Moscow Power Engineering Institute»”, Russia,  
111250, Moscow, Krasnokazarmennaya st., 14, E-mail: asdmitrevi@mail.ru*

## OPTICAL AND INFRARED METHODS OF STUDYING VIEW MAP LEIDENFROST EFFECT

*Surface of power equipment almost always have contact with the droplets of different working fluids. The most important current challenge is to study the influence of the structure and scale of the surface, as well as fluids to the effects of wetting and spreading, as well as heat and mass transfer. In this paper we investigate the Leidenfrost effect - an important phenomenon, which often limits the heat flux from the highly superheated surface to liquid droplets. In the study of boiling drops on substrates coated with disordered carbon microspheres, it was found that on such surfaces Leidenfrost effect is completely suppressed. We investigated the dependence of the*

*evaporation of the droplets for various liquids at different temperatures, substrates, as well as to compare them with those dependencies when the Leidenfrost effect. The model of the Leidenfrost effect suppression, based on the mechanism of "collapse" under steam cushion drop by spreading vapor inside the mesoscopic structure of the substrate.*

LEIDENFROST EFFECT, WETTING AND SPREADING, MESOSCOPIC STRUCTURE,  
LIQUID DROPLET, SUPERHEATED SURFACE