

ОТЗЫВ

официального оппонента

на диссертационную работу **Кочкина Дмитрия Юрьевича**

«ДИНАМИКА ТЕРМОКАПИЛЛЯРНОГО РАЗРЫВА ТОНКОГО СЛОЯ ЖИДКОСТИ НА ГОРИЗОНТАЛЬНОЙ ПОВЕРХНОСТИ С ЛОКАЛЬНЫМ ИСТОЧНИКОМ ТЕПЛА»,

представленную на соискание ученой степени

кандидата физико-математических наук по специальности

1.3.14. Теплофизика и теоретическая теплотехника

Диссертационная работа Кочкина Д.Ю. «ДИНАМИКА ТЕРМОКАПИЛЛЯРНОГО РАЗРЫВА ТОНКОГО СЛОЯ ЖИДКОСТИ НА ГОРИЗОНТАЛЬНОЙ ПОВЕРХНОСТИ С ЛОКАЛЬНЫМ ИСТОЧНИКОМ ТЕПЛА», посвящена экспериментальным исследованиям термокапиллярного разрыва горизонтальной пленки жидкости, локально нагреваемой со стороны подложки. Исследование термокапиллярного разрыва включает в себя изучение термокапиллярных деформаций свободной поверхности, образование остаточной пленки, а также зарождение и распространение сухого пятна.

Актуальность темы

Исследование теплоотвода от локальных источников тепла в настоящее время является одной из востребованных и сложных задач в теплофизике, поскольку связано с различными процессами отвода тепла от горячих локальных областей, включает проблемы охлаждения микроэлектронного оборудования. Поскольку миниатюризации микроэлектронных элементов продолжается, усложняется задача охлаждения подобных локальных источников тепловыделения. Одним из перспективных методов охлаждения электронного оборудования являются технологии, использующие процессы с фазовым превращением, например, испарение тонкого слоя, приводимого в движение потоком газа. В таких системах теплоотвод от источника тепловыделения существенным образом зависят от условий в тонком слое жидкости, где при определенных условиях (относительно невысокие скорости потока жидкости, резкое увеличение мощности нагрева и т.д.) могут возникать кризисные явления, вызванные термокапиллярным эффектом и приводящие к разрыву пленки, оказывая тем самым существенное влияние на теплообмен в газожидкостных системах.

Несмотря на многочисленные исследования, физические механизмы разрыва пленки жидкости на твердой поверхности на сегодняшний день недостаточно поняты. Нагрев может оказывать на нее дополнительное дестабилизирующее воздействие. В целом ряде технологических процессов, включающих в себя нагрев пленок жидкости, обеспечение стабильного пленочного течения является первостепенной задачей, отвечающей за эффективность теплообмена и за корректную работу устройства в целом. Интенсификация теплообмена развивается в направлении значительного снижения толщин жидких пленок, что определяет качественно новые, стесненные межфазными границами условия для процессов кипения и испарения. Тонкие и сверхтонкие пленки жидкости подвергаются воздействию термокапиллярного эффекта, возникающего из-за термически индуцированных градиентов поверхностного натяжения вдоль границы раздела жидкость-газ. Для большинства жидкостей, нагреваемых со стороны подложки, поверхность пленки движется в направлении от мест с большей к местам с меньшей температурой, что может

приводить к неустойчивости и разрыву пленки, при этом роль термокапиллярного эффекта многократно возрастает при локальном нагреве пленок жидкости.

Целью диссертационной работы является экспериментальное исследование термокапиллярного разрыва горизонтальной пленки жидкости, локально нагреваемой со стороны подложки. Исследование термокапиллярного разрыва включает в себя изучение термокапиллярных деформаций свободной поверхности, образование остаточной пленки, а также зарождение и распространение сухого пятна.

В соответствии с целью работы поставлены следующие задачи:

1. Разработать методики комплексного исследования процесса термокапиллярного разрыва горизонтального слоя жидкости
2. Исследовать деформации свободной поверхности горизонтального слоя жидкости, вызванные локальным нагревом со стороны подложки
3. Измерить толщину остаточной пленки, а также определить влияние свойств жидкости на ее толщину
4. Определить влияние свойств жидкости, а также условий эксперимента на пороговую разницу температур между нагревателем и холодильником, необходимую для разрыва горизонтального слоя жидкости
5. Определить влияние шероховатости и смачиваемости поверхности на динамику сухого пятна в процессе термокапиллярного разрыва горизонтального слоя жидкости.

Научная новизна работы состоит в следующем:

1. При помощи адаптированного отражательного синтетического шпирен метода были впервые экспериментально зафиксированы положительные деформации и валы жидкости, возникающие при неоднородном нагреве тонкого слоя жидкости со стороны подложки.
2. В ходе исследований с использованием конфокального датчика, который был адаптирован для измерения микроразмерных пленок жидкости, было впервые установлено, что с ростом вязкости и скорости нагрева толщина остаточной пленки, образующейся в процессе термокапиллярного разрыва слоя жидкости, существенно увеличивается.
3. Экспериментальные данные по толщине остаточной пленки впервые обобщены в зависимости от капиллярного числа, при этом эксперименты проведены с четырьмя различными рабочими жидкостями, вязкость которых отличается в 200 раз.
4. Данные по термокапиллярному разрыву горизонтального слоя жидкости для различных рабочих жидкостей и условий эксперимента впервые обобщены единой корреляционной зависимостью.
5. Показано, что до момента образования сухого пятна смачиваемость поверхности в широком диапазоне краевых углов смачивания не оказывает существенного влияния на стадии термокапиллярной деформации свободной поверхности локально нагреваемого горизонтального слоя жидкости.
6. Установлено, что смачиваемость подложки оказывает существенное влияние на скорость контактной линии (более чем на 5 порядков). Данные по скорости контактной линии в процессе роста сухого пятна в остаточной пленке впервые обобщены единой корреляционной зависимостью.

Научная и практическая значимость работы. Полученная в исследованиях новая экспериментальная информация важна для фундаментального понимания физики процесса разрыва пленок жидкости, а также для создания новых моделей описывающих термокапиллярный разрыв неизотермического слоя жидкости. Полученные в работе результаты будут полезны при разработке различных устройств, характеризующихся

развитием сухих пятен в тонких пленках жидкости. В частности, устройств с локальным и неоднородным по времени тепловыделением.

Положения, выносимые на защиту

1. Результаты адаптации отражательного синтетического шпирен-метода для измерения деформаций свободной поверхности, возникающих при неоднородном нагреве тонкого слоя жидкости со стороны подложки.
2. Результаты по применению адаптированного конфокального датчика для измерения микроразмерных пленок жидкости. Результаты экспериментального исследования влияния вязкости и скорости нагрева на толщину остаточной пленки. Обобщение экспериментальных данных по толщине остаточной пленки.
3. Результаты экспериментального исследования термокапиллярного разрыва горизонтальных слоев различных рабочих жидкостей в разных условиях эксперимента. Обобщение данных.
4. Результаты исследования влияния свойств подложки в широком диапазоне краевых углов смачивания и шероховатости на термокапиллярный разрыв локально нагреваемого горизонтального слоя жидкости.
5. Результаты по экспериментальному исследованию влияния свойств подложки в широком диапазоне краевых углов смачивания и шероховатости на скорость контактной линии при распространении сухого пятна в горизонтальном слое жидкости в процессе термокапиллярного разрыва.

Достоверность полученных результатов обеспечивается использованием современных методов, проведением калибровочных измерений, анализом погрешностей, воспроизводимостью полученных экспериментальных данных. Используемые методики предварительно тестировались, а результаты сравнивались с известными корреляциями. Достоверность полученных данных обусловлена также публикацией результатов исследований в жестко рецензируемых научных журналах, в том числе журналах первого квартиля.

Личный вклад соискателя. Основные научные результаты, включенные в диссертацию и выносимые на защиту, получены соискателем лично. Вклад автора состоял в проектировании и сборке экспериментальных установок и рабочих участков, подготовке и проведении всех представленных в работе экспериментов, разработке и тестировании комплекса численных алгоритмов для анализа базы полученных экспериментальных данных, обработке и анализе результатов, подготовке статей для публикации в рецензируемых журналах и докладов на конференциях.

Апробация результатов. Материалы диссертации были представлены на ведущих российских и международных конференциях: Всероссийской школе–конференции молодых ученых «Актуальные вопросы теплофизики и физической гидрогазодинамики» (Новосибирск, 2016, 2020); Школе–семинаре молодых ученых и специалистов под руководством академика РАН А. И. Леонтьева (Москва, 2019); Сибирском теплофизическом семинаре, (Новосибирск, 2017, 2018, 2019, 2020, 2021); 2nd Int. School of Young Scientists — Interfacial Phenomena and Heat Transfer (Новосибирск, 2017); V Всероссийская конференция «Теплофизика и физическая гидродинамика» (Ялта, Республика Крым, 2020).

Публикации. По теме диссертации опубликовано более тридцати работ, включая 18 статей – в печатных изданиях, входящих в перечень ведущих рецензируемых научных журналов и изданий, рекомендованных ВАК.

Объем и структура работы. Диссертация состоит из введения, четырех глав и заключения. Полный объем диссертации составляет 119 страниц с 77 рисунками и 5 таблицами. Список литературы содержит 130 наименований.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность работы, определена цель и поставлены задачи исследований, сформулированы научная новизна и практическая значимость работы, представлены основные положения, выносимые на защиту.

В первой главе отражено современное состояние исследуемой области науки, приведен аналитический обзор известных экспериментальных и теоретических исследований термокапиллярной конвекции. Из анализа литературы сделаны следующие выводы:

- достаточно хорошо исследованы термокапиллярные деформации свободной поверхности локально нагреваемых пленок жидкости, а также эволюция и устойчивость сухих пятен в изотермических пленках жидкости. Однако процесс термокапиллярного разрыва, т.е. переход от макропленки к субмикронной пленке и распространение сухого пятна, практически не исследованы, особенно в случае локального нагрева;
- важным аспектом проблемы термокапиллярного разрыва пленки жидкости является вопрос о влиянии смачиваемости и шероховатости подложки;
- отсутствуют понимание механизма образования остаточной пленки, а также количественные данные о ее толщине;
- крайне важным является разработка экспериментальных методов с высоким пространственным и временным разрешением для детального исследования процессов в тонких пленках жидкостей.

Вторая глава посвящена описанию экспериментальных стендов и методик измерения. Представленное исследование выполнялось экспериментальным путем на двух специально разработанных и взаимодополняющих экспериментальных стендах, основное отличие которых заключалось в различном подводе тепла к подложке, на которой находился горизонтальный слой рабочей жидкости. На одном из стендов реализован кондуктивный нагрев подложки, в то время как на другом подвод тепла к нижней стороне подложки осуществляется при помощи лазера. Температура жидкости по периметру кюветы поддерживается постоянной за счет прокачки воды заданной температуры через систему термостабилизации периметра кюветы. В качестве рабочих жидкостей применялись сверхчистая вода Milli-Q, этанол а также силиконовые масла различной вязкости (PMS-5, PMS-100, PMS-200). После включения нагрева под действием термокапиллярных сил пленка жидкости сначала деформируется (утончается) над нагревателем, а в конечном итоге разрывается, образуя сухое пятно. Температура поверхности жидкости измерялась ИК-сканером. Для измерения мгновенной локальной толщины слоя жидкости используется контроллер Micro-Epsilon IFC2451 с конфокальными хроматическими сенсорами IFS2405-0.3 и IFS2405-3. Конфокальный оптический сенсор установлен на платформу позиционного устройства и ориентирован перпендикулярно поверхности подложки. Измерения толщины слоя жидкости могут осуществляться как в фиксированной точке, так и линейным перемещением сенсора подвижкой вдоль подложки.

Для визуализации деформации и разрыва горизонтального слоя жидкости применялась оптическая шлирен-система со скоростной видеокамерой. Программа анализирует шлирен-изображения в оттенках серого за счет бинаризации, а также анализа градиента. Для измерения деформации свободной поверхности пленки жидкости в работе использовался адаптированный синтетический (фоново-ориентированный) шлирен-метод

с отражательной оптической схемой, включающей расположенный над поверхностью жидкости фон со случайным точечным рисунком, и камеру, фиксирующую его отражение от поверхности жидкости. Локальные наклоны поверхности пленки вызывают смещение точек на изображении фона относительно изображения фона, снятого при отсутствии каких-либо деформаций свободной поверхности. Следовательно, топография поверхности жидкой пленки кодируется кажущимся смещением точечного рисунка на изображении фона, при помощи кросскорреляционной обработки изображений фона восстанавливался профиль свободной поверхности пленки жидкости.

В **третьей главе** рассматривается динамика в тонком слое жидкости с неоднородным нагревом со стороны подложки. Изучены термокапиллярные деформации, а также микровозмущения свободной поверхности пленки жидкости, вызванные ее локальным нагревом. В ходе исследований с использованием конфокального датчика было впервые установлено, что с ростом вязкости и скорости нагрева толщина остаточной пленки, образующейся в процессе термокапиллярного разрыва слоя жидкости, существенно увеличивается. Получены экспериментальные данные по толщине остаточной пленки впервые обобщены в зависимости от капиллярного числа, при этом эксперименты проведены с четырьмя различными рабочими жидкостями, вязкость которых изменяется в 200 раз. Подтверждено, что с увеличением толщины слоя жидкости, находящегося в парогазовой среде, возрастает пороговая разница температур вдоль кюветы, необходимая для его разрыва. Данные по термокапиллярному разрыву горизонтального слоя жидкости для шести рабочих жидкостей и различных условий эксперимента впервые обобщены единой корреляционной зависимостью. Кроме того, показано, что до момента образования сухого пятна смачиваемость поверхности в широком диапазоне краевых углов смачивания не оказывает существенного влияния на стадии термокапиллярной деформации свободной поверхности локально нагреваемого горизонтального слоя жидкости, находящегося в парогазовой среде. Установлено также, что смачиваемость подложки оказывает существенное влияние на скорость контактной линии (более чем на 5 порядков).

В **четвертой главе** приведены результаты систематических экспериментальных исследований влияния шероховатости и смачиваемости подложки на процесс термокапиллярного разрыва горизонтального локально нагреваемого снизу слоя жидкости. Представлены результаты исследования динамики, теплообмена, а также условий разрыва открытого в атмосферу горизонтального слоя жидкости, сформированного на сменных подложках двух рабочих участков, локально нагреваемых двумя различными способами. Диапазон тепловых потоков, необходимых для разрыва пленок жидкости средней толщиной 330-1030 мкм, на рабочем участке с кондуктивным нагревом составляет примерно от 0,8 до 7,6 Вт/см², и от 1,5, до 12,3 Вт/см² на рабочем участке с лазерным нагревом для разрыва пленок жидкости толщиной 200-600 мкм. Исследования показали, что с увеличением начальной толщины горизонтального слоя жидкости возрастает разница температур между нагревателем и холодильником, необходимая для разрыва слоя. Данный эффект объясняется тем, что основными конкурирующими силами в данной задаче являются сила Марангони (термокапиллярный эффект), стремящаяся утонить слой в более горячей области, а также гидростатический напор, вызванный гравитацией и препятствующий возникновению перепада высот в слое жидкости. При этом сила Марангони характеризуется разницей температур между нагревателем и холодильником, а гидростатический напор толщиной слоя жидкости. Другими словами, с увеличением толщины слоя жидкости, увеличивается и гидростатическая сила, препятствующая возникновению в пленке перепада толщин, следовательно, для разрыва слоя необходим больший градиент температуры. Далее в главе 4 рассмотрена динамика контактной линии

в процессе роста сухого пятна на подложках различной шероховатости и смачиваемости. Представленные в данном разделе данные описывают динамику сухого пятна в процессе термокапиллярного разрыва слоя жидкости на подложках различной шероховатости и смачиваемости.

В заключении диссертационной работы сформулированы основные выводы:

- при помощи адаптированного отражательного синтетического шпирен-метода впервые экспериментально зафиксированы положительные деформации и валы жидкости, возникающие при неоднородном нагреве тонкого слоя жидкости со стороны подложки;
- в ходе исследований с использованием конфокального датчика, который был адаптирован для измерения микроразмерных пленок жидкости, впервые установлено, что с ростом вязкости и скорости нагрева толщина остаточной пленки, образующейся в процессе термокапиллярного разрыва слоя жидкости, существенно увеличивается;
- экспериментальные данные по толщине остаточной пленки впервые обобщены в зависимости от капиллярного числа, при этом эксперименты проведены с четырьмя различными рабочими жидкостями, вязкость которых изменяется в 200 раз;
- подтверждено, что с увеличением толщины слоя жидкости, находящегося в парогазовой среде, возрастает пороговая разница температур вдоль кюветы, необходимая для его разрыва. Данные по термокапиллярному разрыву горизонтального слоя жидкости для шести рабочих жидкостей и различных условий эксперимента впервые обобщены единой корреляционной зависимостью;
- показано, что до момента образования сухого пятна смачиваемость поверхности в широком диапазоне краевых углов смачивания не оказывает существенного влияния на стадии термокапиллярной деформации свободной поверхности локально нагреваемого горизонтального слоя жидкости, находящегося в парогазовой среде;
- установлено, что смачиваемость подложки оказывает существенное влияние на скорость контактной линии (более чем на 5 порядков). Данные по скорости контактной линии в процессе роста сухого пятна в остаточной пленке впервые обобщены единой корреляционной зависимостью.

В качестве замечаний по работе можно отметить следующее.

1. В работе отсутствуют оценки термического контактного сопротивления между подложкой и слоями жидкости для проводимых экспериментов; эти оценки важны, поскольку позволяют оценить влияние термосопротивления на все стадии термокапиллярной эволюции при разрыве пленок. Это тем более важно, что эксперименты поведены для большого числа морфологически и масштабно различных подложек.
2. В диссертационной работе указывается, что при использовании воды в качестве рабочей жидкости, бралась сверхчистая вода Milli-Q, однако не указано, проверялась ли данная жидкость на наличие растворенного газа (или пара), что может быть важным для трактовки результатов экспериментов. В какой-то мере, такая же ситуация имеет место и для силиконовых масел, поскольку в них также наблюдаются отдельные примеси и даже растворенные газы.
3. При лазерном нагреве нижней стороны подложки в работе ничего не сказано о стабильности лазерного излучения, которое для непрерывных лазеров указанного в работе диапазона может меняться за время нагрева.
4. На рисунке 4.22, где представлена динамика линии контакта на подложках различной смачиваемости при начальной толщине слоя воды $h_0 = 400$ мкм, хотелось бы видеть в большем масштабе поведение контактной линии при малых скоростях.
5. В диссертационной работе не сказано, как определялись величины наступающего и отступающего контактных углов; по-видимому, они выбирались при исследовании

статистических контактных углов, что в ряде случаев некорректно. Помимо этого, ничего не сказано как изменяются контактные углы при изменениях температуры – как правило, на гидрофобных и супергидрофобных подложках, а также для подложек на базе наноматериалов (нанотрубки, графен и т.п.), имеет место весьма сильная зависимость контактных углов от температуры.

6. К сожалению, из результатов работы осталось не совсем понятным, каково влияние шероховатости и смачиваемости поверхности на динамику сухого пятна в процессе термокапиллярного разрыва горизонтального слоя жидкости. Дело в том, что не только шероховатость, но и морфология поверхности (структурность, материалы и т.п.) влияют на динамику контактных линий. Более того, характер такого влияния в существенной степени зависит от температуры, поскольку, например, гистерезис контактного угла является механизмом, связанным с температурным пиннингом контактной линии.

Несмотря на сделанные замечания, в целом диссертационная работа Кочкина Д.Ю. «ДИНАМИКА ТЕРМОКАПИЛЛЯРНОГО РАЗРЫВА ТОНКОГО СЛОЯ ЖИДКОСТИ НА ГОРИЗОНТАЛЬНОЙ ПОВЕРХНОСТИ С ЛОКАЛЬНЫМ ИСТОЧНИКОМ ТЕПЛА», представляет законченное исследование по одной из важнейших проблем теплофизики - термокапиллярного разрыва горизонтальной пленки жидкости, локально нагреваемой со стороны подложки. Тема работы весьма актуальна, научные положения диссертационной работы достаточно обоснованы, выбранные методы исследования и применяемые средства измерений адекватны рассматриваемым процессам. Новизна результатов работы не вызывает сомнений, выводы диссертационной работы и рекомендации также весьма обоснованы. Диссертация написана хорошим языком, содержит всю необходимую информацию о проведенных исследованиях. Автореферат соответствует содержанию диссертации. Публикации, приведенные в списке литературы, правильно отражают результаты исследований и выводы, изложенные в диссертации.

Таким образом, диссертация Кочкина Д.Ю. «ДИНАМИКА ТЕРМОКАПИЛЛЯРНОГО РАЗРЫВА ТОНКОГО СЛОЯ ЖИДКОСТИ НА ГОРИЗОНТАЛЬНОЙ ПОВЕРХНОСТИ С ЛОКАЛЬНЫМ ИСТОЧНИКОМ ТЕПЛА» соответствует критериям, установленным Положением о порядке присуждения ученых степеней (п. 9), утвержденным постановлением Правительства Российской Федерации от 24 сентября 2013 г. №842, а её автор заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.14. Теплофизика и теоретическая теплотехника.

Доктор технических наук, профессор кафедры низких температур
Национального исследовательского университета «МЭИ»



А. С. Дмитриев
28.09.2023

Федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего
профессионального образования «Национальный
исследовательский университет «МЭИ»,
Институт тепловой и атомной энергетики,
кафедра низких температур, 111250, г. Москва, ул.
Красноказарменная, д.14. E-mail: asdmitriev@mail.ru,
тел.: +7 (495) 362-79-33



Дмитриев

ЗАМЕСТИТЕЛЬ НАЧАЛЬНИКА
КАФЕДРЫ ПО ВЗАИМОДЕЙСТВИЮ С ПЕРСОНАЛОМ
Л.И. ПОЛЕВАЯ