

УТВЕРЖДАЮ

И.о. директора ИТ СО РАН

д.ф.-м.н. О.В. Шарыпов



«29» мая 2023 г.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Федерального государственного бюджетного учреждения науки

Института теплофизики им. С.С. Кутателадзе

Сибирского отделения Российской академии наук (ИТ СО РАН)

Диссертация на соискание степени кандидата физико-математических наук «Динамика термокапиллярного разрыва тонкого слоя жидкости на горизонтальной поверхности с локальным источником тепла» выполнена Кочкиным Д.Ю. в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институте теплофизики им. С.С. Кутателадзе Сибирского отделения Российской академии наук (ИТ СО РАН).

В 2019 году Кочкину Д.Ю. присуждена степень магистра, диплом магистра с отличием. В настоящее время Кочкин Д.Ю. работает инженером-исследователем в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институте теплофизики им. С.С. Кутателадзе Сибирского отделения Российской академии наук (ИТ СО РАН).

По итогам обсуждения принято следующее **заключение**.

Актуальность темы. Физические механизмы разрыва пленки жидкости на твердой поверхности на сегодняшний день недостаточно изучены. Отчасти, это связано с большим количеством параметров системы жидкая пленка-подложка, от которых зависит этот сложный процесс. Наличие нагрева в данной системе 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. Роль термокапиллярного эффекта многократно возрастает при локальном нагреве пленок жидкости.

В свою очередь, исследование теплоотвода от локального источника тепла становится в настоящее время одной из наиболее востребованных и сложнейших задач в теплофизике, поскольку прямым образом связано с проблемой охлаждения микроэлектронного оборудования. В настоящее время темпы развития технологий невероятно быстры, поэтому производительность оборудования, а значит и мощность, выделяемая на микрочипах, с каждым годом растет. С другой стороны, производители современных чипов стремятся достичь как можно большей компактности своего продукта, что существенно усложняет задачу 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 могут возникать кризисные явления, вызванные термокапиллярным эффектом и приводящие к разрыву плёнки, оказывая тем самым существенное влияние на теплообмен в газожидкостных системах.

Цель работы:

Целью диссертационной работы является экспериментальное исследование термокапиллярного разрыва горизонтальной пленки жидкости, локально нагреваемой со стороны подложки, включающего в себя термокапиллярные деформации свободной поверхности, образование остаточной пленки, нуклеацию и динамику сухого пятна.

Поставлены и решены следующие задачи:

- Разработка методики комплексного исследования процесса термокапиллярного разрыва горизонтального слоя жидкости
- Исследование деформации свободной поверхности горизонтального слоя жидкости, вызванные локальным нагревом со стороны подложки
- Измерение толщины остаточной пленки, а также определение влияния свойств жидкости на ее толщину
- Определение влияния свойств жидкости, а также условий эксперимента на пороговую разницу температур между нагревателем и холодильником, необходимую для разрыва горизонтального слоя жидкости

- Определение влияния шероховатости и смачиваемости поверхности на динамику сухого пятна в процессе термокапиллярного разрыва горизонтального слоя жидкости

Научная новизна основных положений, результатов и выводов, полученных в диссертации:

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 поведены с четырьмя различными рабочими жидкостями, а вязкость изменяется 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.

Теоретическая и практическая значимость работы:

Полученные в работе результаты будут полезны при разработке различных аппаратов, характеризующихся развитием сухих пятен в тонких пленках жидкости. В частности аппаратов с локальным и неоднородным по времени тепловыделением.

Степень достоверности результатов:

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 данными других авторов. Достоверность полученных данных обусловлена также публикацией результатов исследований в жестко рецензируемых научных журналах, в том числе журналах первого квартиля.

На защиту выносятся:

- Результаты адаптации отражательного синтетического шпирен метода для измерения деформаций свободной поверхности, возникающих при неоднородном нагреве тонкого слоя жидкости со стороны подложки.
- 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.
- Результаты экспериментального исследования термокапиллярного разрыва горизонтальных слоев различных рабочих жидкостей в разных условиях эксперимента. Обобщение данных.
- Результаты исследования влияния свойств подложки в широком диапазоне краевых углов смачивания и шероховатости на термокапиллярный разрыв локально нагреваемого горизонтального слоя жидкости.
- 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.

Личный вклад автора:

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. Постановка решаемых задач проводилась диссертантом как лично, так и совместно с научным руководителем диссертационной работы чл.-корр. РАН, д.ф.-м.н., профессором Кабовым Олегом Александровичем.

Список работ автора по тематике диссертации, опубликованных в ведущих рецензируемых научных журналах и изданиях, рекомендованных ВАК:

1. Kochkin D., Mungalov A., Zaitsev D., Kabov O. Use of the reflective background oriented schlieren technique to measure free surface deformations in a thin liquid layer non-uniformly heated from below // *Experimental Thermal and Fluid Science*. – 2022. – V. 133, no. 110576.
2. Zaitsev D., Kochkin D., Kabov O. Dynamics of liquid film rupture under local heating // *International Journal of Heat and Mass Transfer*. – 2022. – V. 184, art. no. 122376.
3. Ronshin F., Dementyev Y., Kochkin D., Eloyan K., Vozhakov I. 6 Investigation of two-phase flow regimes in square minichannels with different mixers created using additive technologies // *Experimental Thermal and Fluid Science*. – 2022. – V. 132, pp. 110565. DOI 10.1016/j.expthermflusci.2021.110565.
4. Vozhakov, I.S., Lukyanov, A.A., Kochkin, D.Y., Ronshin, F.V. Experimental and numerical study of Taylor flow in a square minichannel, *Physics of Fluids*, 2022, 34(12), 122103
5. Kochkin, D.Y., Zaitsev, D.V., Kabov, O.A. Thermocapillary rupture and contact line dynamics in the heated liquid layers (2020) *Interfacial Phenomena and Heat Transfer*, 8 (1), pp. 1-9.

Апробация работы: 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).

Соответствие содержания диссертации специальности, по которой она рекомендуется к защите:

Диссертация Кочкина Д.Ю., посвященная экспериментальному исследованию динамики и теплообмена в тонком испаряющемся слое жидкости с разрывами,

соответствует паспорту специальности 1.3.14 – *“Теплофизика и теоретическая теплотехника”* для физико-математических наук.

Решение о рекомендации к защите.

Диссертация «Динамика термокапиллярного разрыва тонкого слоя жидкости на горизонтальной поверхности с локальным источником тепла» Кочкина Дмитрия Юрьевича рекомендуется к защите на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.14 – *“Теплофизика и теоретическая теплотехника”*.

Заключение принято на заседании секции 4 "Разреженные газы, плазма, теплофизика на микро- и наномасштабах" Ученого совета Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института теплофизики им. С.С. Кутателадзе Сибирского отделения Российской академии наук (ИТ СО РАН) под руководством профессора РАН, д.ф.-м.н., И.В. Марчука. В качестве замечаний высказано пожелание устранить опечатки в диссертации и автореферате.

Присутствовало на заседании 13 человек, в том числе 5 докторов наук, 5 кандидатов наук. Результаты голосования: «за» – 13 человек, «против» – 0 человек, «воздержалось» – 0 человек. Протокол № 5 от 29 мая 2023 года.



Председатель семинара

Марчук Игорь Владимирович, профессор РАН,
д.ф.-м.н., декан механико-математического
факультета НГУ, ведущий научный сотрудник ИТ
СО РАН



Секретарь семинара

Чеведа Вячеслав Владимирович, к.ф.-м.н.,
старший научный сотрудник ИТ СО РАН