

ОТЗЫВ ОФИЦИАЛЬНОГО ОППОНЕНТА

на диссертацию Кочкина Дмитрия Юрьевича на тему «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»

Тепловое воздействие на систему и регистрация ее отклика служит информативным подходом к исследованию свойств веществ и механизмов протекающих в них процессов. Дополнительный импульс данный подход получил в связи с развитием микросистемной техники и основанных на ней технологий, отнесенным к характерным тенденциям последних трех десятилетий [Рудяк В.Я., Минаков А.В. Современные проблемы микро- и нанофлюидики. Новосибирск: Наука, 2016]. Рост производительности микроэлектронных устройств при одновременном уменьшении их характерных размеров ведет к увеличению генерируемого ими теплового потока на единицу площади. По этой причине, исследования отведения теплоты от локального источника тепла остаются актуальными в ряду задач современной теплофизики. Многообещающий путь повышения эффективности теплообмена стенки с теплоносителем состоит в снижении толщины жидких пленок. Вовлечение в исследование тонких и сверхтонких пленок сопровождается появлением дополнительной проблемы, а именно, термокапиллярного эффекта, оказывающего существенное влияние на теплообмен. Характерная черта термокапиллярного разрыва пленки заключается в том, что в ходе процесса толщина пленки изменяется на несколько порядков, что обуславливает нетривиальность выбора средств для его экспериментального изучения. В этой связи, решаемая автором задача комплексного исследования процесса термокапиллярного разрыва горизонтального слоя жидкости является сложной по сути, актуальной по тематике и практически значимой по содержанию.

Научная новизна работы состоит в адаптации современных методик с высоким пространственным и временным разрешением и их применении для динамических измерений тонких плёнок жидкости; при их помощи впервые были обнаружены положительные деформации и валы жидкости, возникающие при неоднородном нагреве тонкого слоя жидкости со стороны подложки; установлено, что с ростом вязкости и скорости нагрева толщина остаточной пленки существенно увеличивается; данные по толщине остаточной пленки были обобщены в зависимости от капиллярного числа; данные по термокапиллярному разрыву горизонтального слоя жидкости, как и данные по скорости контактной линии в процессе роста сухого пятна в остаточной пленке впервые были обобщены единой корреляционной зависимостью.

Теоретическая и практическая значимость работы состоит в получении нового знания, важного для фундаментального понимания физики процесса разрыва пленок жидкости, в итоге, для разработки новых моделей, описывающих термокапиллярный разрыв неизотермического слоя теплоносителя, в том числе, в устройствах с локальным и неоднородным по времени тепловыделением.

Достоверность полученных результатов обеспечивается применением современных методов, проведением калибровочных измерений, подтверждается анализом погрешностей, повторяемостью первичных данных в серии опытов при идентичных начальных параметрах системы, публикацией результатов исследований в научных журналах, в том числе, журналах первого квартиля, а также признанным авторитетом научной группы руководителя диссертанта.

Личный вклад автора Вклад автора состоял в проектировании и изготовлении экспериментальных установок, подготовке и проведении представленных в работе опытов, разработке и тестировании комплекса численных алгоритмов для анализа массива первичных данных, подготовке статей для публикации в журналах и докладов на конференциях.

Структура диссертации

Введение обосновывает актуальность, практическую значимость объекта изучения, формулировку цели и задач исследования, научную новизну полученных результатов, поясняет личный вклад соискателя.

Первая глава содержит достаточно полный обзор состояния исследований термокапиллярной конвекции. Автор уделил внимание обсуждению методов измерения толщины пленки жидкости, как ключевого аспекта решаемой задачи, в различных условиях течения пленок, типа границ раздела и тепловыделения в стенке. Отмечено явление формирования тонкой остаточной пленки на поверхности нагревателя, предшествующее образованию сухого пятна. Далее, факт изменения толщины пленки на несколько (до 5-6) порядков в ходе ее разрыва выделен в качестве специфического требования к резерву применяемых методов и методик исследования.

В выводах по первой главе, в частности, отмечено, что процессы термокапиллярного разрыва, т.е. переход от макро-пленки к субмикронной пленке и распространения сухого пятна, «практически не исследованы, особенно в случае локального нагрева»; для их детального исследования потребуется разработка экспериментальных методов с высоким пространственным и временным разрешением. Выводы по первой главе естественным образом выводят на постановку задачи под диссертационную работу, хотя в явном виде эта задача здесь не сформулирована.

Во второй главе подробно описаны созданные под задачу экспериментальные установки, разработанные методики измерений, обработка первичных данных (разработан алгоритм обработки изображений в среде Matlab) и, кратко, дана оценка погрешностей измерений. Опыты поставлены на двух взаимодополняющих стендах, основное отличие которых заключалось в различии способов подвода тепла к подложке (кондуктивный нагрев и нагрев при помощи лазера), на которой находился горизонтальный слой рабочей жидкости. Перечень оборудования и его назначение пояснены в отдельной

таблице. Устройство установок и рабочих участков представлено на красочных схемах и фотографиях стендов.

Суть измерений состояла в отслеживании толщины остаточной пленки в ходе нагрева центральной части подложки. Пристальное внимание уделено соотношению полезный сигнал/паразитный сигнал конфокального датчика, которое удалось существенно (на два порядка) повысить за счет нанесения специального покрытия на поверхность подложки. Отметим, что в методике разностных, то есть, двукратных измерений паспортная погрешность датчика (1,5 мкм) возрастает. Данное обстоятельство необходимо учитывать и полезно отразить на графиках, указывая доверительный интервал результатов опытов. Самый тонкий момент в быстрых опытах – расчет температуры поверхности пленки по измерениям первичных величин. В этой связи, важно уточнить вопрос соответствия измерений температуры именно поверхности жидкости, а не интегральной температуре пленки. Также важны детали нагрева кремниевой подложки лазером — на какой длине волны работает лазер, полностью ли излучение поглощается подложкой, не выходит ли оно частично в жидкость, влияя, тем самым, на показания тепловизора.

Теплофизические свойства рабочих жидкостей и свойства поверхности вовлеченных в опыты подложек сведены в отдельные таблицы. Для выяснения влияния смачиваемости подложек осуществлены измерения краевого угла смачивания в условиях натекания и оттекания жидкости. Синтетический шлирен-метод и конфокальный метод удалось адаптировать для измерения тонких плёнок жидкости путем снижения паразитного отражения от подложки. В итоге, совместное использование экспериментальных методик с высоким пространственным и временным разрешением (ИК термография, классический и синтетический шлирен-метод, скоростная видеосъемка, конфокальный метод, адаптированные под условия опытов) позволило получить новые данные по релаксации тонких плёнок жидкости при их нагреве.

Третья глава содержит результаты по динамике в тонком слое жидкости с

неоднородным нагревом со стороны подложки и их анализ. Ее основным результатом считаю обобщение данных по толщине остаточной пленки для различных жидкостей в безразмерных координатах, в виде степенной функции капиллярного числа.

В ее первой части исследована эволюция свободной поверхности локально нагреваемой пленки жидкости. Применен фонов-ориентированный синтетический шпирен метод с отражательной оптической схемой, включающий фон со случайным точечным рисунком, расположенный над поверхностью жидкости, и камеру, фиксирующую его отражение от поверхности жидкости. По-видимому, впервые были обнаружены положительные деформации и валы жидкости, возникающие при заданных условиях опыта. В ее второй части исследована динамика разрыва локально нагреваемой пленки жидкости – воды и полидиметилсилоксанов различной вязкости. Обнаружено нетривиальное явление образования остаточной пленки, объясненное вязким трением в жидкости, препятствующим полному разрыву пленки.

В **четвертой** главе приведены результаты исследований влияния шероховатости и смачиваемости подложки на процесс термокапиллярного разрыва локально нагреваемого слоя жидкости. Ее основным результатом считаю обобщение массива данных по разрыву горизонтального слоя жидкости в безразмерных координатах с привлечением критического числа Марангони, отвечающего за термокапиллярный эффект. В ходе опытов было выяснено, что до момента зарождения сухого пятна влияния смачиваемости подложки (в широком диапазоне краевых углов) на динамику термокапиллярного разрыва не наблюдается, однако после появления сухого пятна смачиваемость подложки оказывает существенное влияние на динамику контактной линии (масштаб эффекта составляет до 5 порядков). Измерения толщины слоя жидкости проведены как в избранной точке, так и вдоль подложки путем линейного перемещения конфокального хроматического датчика, установленного на платформе системы позиционирования. В свою очередь, данные по скорости

контактной линии в процессе роста сухого пятна в остаточной пленке также обобщены единой корреляционной зависимостью.

В заключении перечислены основные результаты работы, см. также пункт 2 в следующем разделе.

Замечания по диссертации

1. По теме диссертации нет статей на русском языке. А рассматриваемый вопрос важен для русскоязычного сообщества. Поиск результатов, сведенных в итоговый перечень, по публикациям в AIP-журналах затруднен. Тем более, компактность диссертации (это ее плюс) предполагает обращение к исходным публикациям.
2. Не выделен центральный результат исследования. Выводы, перечисленные на стр. 107, согласуются с поставленными задачами (за исключением влияния шероховатости подложки). Но из них не очевиден вклад исследования в решение ключевого вопроса обеспечения «стабильного пленочного течения», отвечающего «за корректную работу устройства в целом», см. стр. 4.
3. В этой связи, уместным выглядит обсуждение шагов по развитию исследования, резервы которого явно просматриваются, с учетом упомянутого выше ключевого вопроса.
4. «Паспортная» величина неопределенности распределения температуры по поверхности пленки в 18 мК выглядит, скорее, как ее оценка снизу.
5. Неточности, затрудняющие восприятие деталей работы: на рис. 4.1, 4.7 и 4.10 не дана расшифровка представленных символами параметров, на стр. 92 приведена ссылка на соотношение (4.3.1), отсутствующее в тексте, применены неудачные термины «разница температур», стр. 85, 89, 91, 103, и «градиент температуры», стр. 73, 86, 93, 98, недоступный для измерения в опыте.

Замечания сформулированы с учетом перспектив развития исследования и не

влияют на его общую положительную оценку. Работа выполнена на высоком научно-техническом уровне, основанном на применении современной измерительной и вычислительной базы, в чем оппонент смог убедиться при знакомстве с экспериментальными стендами, изготовленными диссертантом, а также при обсуждении деталей вынесенных на защиту положений во время посещения его лаборатории.

Заключение

Диссертация «Динамика термокапиллярного разрыва тонкого слоя жидкости на горизонтальной поверхности с локальным источником тепла», представленная Д.Ю. Кочкиным на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук, представляет собой научно-квалификационную работу, выполненную на высоком исследовательском уровне и на актуальную тему. Текст диссертации написан технически грамотным языком, соответствующим по стилю общепринятому в технической литературе. Текст автореферата дает представление о сути выполненного исследования. Результаты работы опубликованы в международных журналах, в том числе, по материалам российских конференций.

Диссертация соответствует требованиям п. 9-11, 13, 14 «Положения о присуждении ученых степеней», утвержденным постановлением Правительства Российской Федерации от 24 сентября 2013 г. №842, и рекомендуется к защите на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.14 «Теплофизика и теоретическая теплотехника».

Считаю, что Дмитрию Юрьевичу Кочкину может быть присуждена ученая степень кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.14 Теплофизика и теоретическая теплотехника.

Ведущий научный сотрудник лаборатории
быстропротекающих процессов и физики кипения
Федерального государственного бюджетного учреждения науки

Института теплофизики Уральского отделения
Российской академии наук,
Доктор физико-математических наук по
специальности 01.04.14 - теплофизика и
теоретическая теплотехника

Скрипов Павел Владимирович

21 сентября 2023 г.

Отзыв составил Скрипов Павел Владимирович, ФГБУН Институт
теплофизики Уральского отделения Российской академии наук, 620016, г.
Екатеринбург, ул. Амундсена, д. 106
pavel-skripov@bk.ru, тел +7(343) 267-8800, сайт: <http://itp.uran.ru/>

Подпись д. ф.-м. н. П.В. Скрипова заверяю:

Демоскрецкозигити



Е. А. Колосов

Я, Скрипов Павел Владимирович, даю согласие на включение своих
персональных данных в документы, связанные с защитой диссертации Кочкина
Дмитрия Юрьевича, и их дальнейшую обработку.