На правах рукописи

(to un ??

## Кочкин Дмитрий Юрьевич

# ДИНАМИКА ТЕРМОКАПИЛЛЯРНОГО РАЗРЫВА ТОНКОГО СЛОЯ ЖИДКОСТИ НА ГОРИЗОНТАЛЬНОЙ ПОВЕРХНОСТИ С ЛОКАЛЬНЫМ ИСТОЧНИКОМ ТЕПЛА

1.3.14. Теплофизика и теоретическая теплотехника

ΑΒΤΟΡΕΦΕΡΑΤ

диссертации на соискании ученой степени кандидата физико-математических наук

Новосибирск - 2023

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институте теплофизики им. С.С. Кутателадзе Сибирского отделения Российской академии наук (ИТ СО РАН)

Научный руководитель:	доктор физико-математических наук, профессор, член-корреспондент РАН Кабов Олег Александрович
Официальные оппоненты:	Скрипов Павел Владимирович - доктор физико-математических наук, профессор, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт теплофизики Уральского отделения Российской академии наук, ведущий научный сотрудник лаборатории быстропротекающих процессов и физики кипения
	Дмитриев Александр Сергеевич - доктор технических наук, профессор, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Национальный исследовательский университет «МЭИ», профессор кафедры низких температур
Ведущая организация:	Институт механики сплошных сред Уральского отделения Российской академии наук — филиал Федерального государственного бюджетного учреждения науки Пермского Федерального исследовательского центра Уральского

Защита состоится 18 октября 2023 года в 15 часов 00 минут на заседании диссертационного совета 24.1.129.01, созданного на базе ИТ СО РАН по адресу: 630090, г. Новосибирск, пр. Академика Лаврентьева, д. 1.

отделения Российской академии наук

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте ИТ СО РАН: www.itp.nsc.ru. Отзыв на автореферат в двух экземплярах, заверенный печатью учреждения, просьба отправлять на имя ученого секретаря диссертационного совета по адресу: 630090, г. Новосибирск, пр. Академика Лаврентьева, д. 1. (еmail: dissovet@itp.nsc.ru).

Автореферат разослан «\_\_\_\_» сентября 2023 г.

Ученый секретарь диссертационного совета д.ф.-м.н., профессор РАН

Терехов Владимир Викторович

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность исследования. 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 работу устройства в целом. Интенсификация корректную 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 пленки. Роль термокапиллярного эффекта И разрыву 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 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 плёнки, оказывая тем самым существенное влияние на теплообмен в газожидкостных системах.

Основная сложность исследования термокапиллярного разрыва пленки заключается в том, что в ходе разрыва толщина пленки изменяется на несколько порядков, что осложняет изучение данного явления как экспериментально, так и теоретически. Полной модели явления, описывающей переход от термокапиллярных деформаций к образованию сухих пятен, до сих пор не создано. Феномен разрыва тонких пленок жидкости является сложным явлением,

3

так как тесно связан с физикой контактной линии и, на текущий момент, остается не полностью изученным.

диссертационной работы Целью 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, a также зарождение И распространение сухого пятна.

В соответствии с целью работы были 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

- 1. При помощи адаптированного отражательного синтетического шлирен 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, 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 аппаратов, характеризующихся развитием сухих пятен в тонких пленках жидкости. В частности аппаратов с локальным и неоднородным по времени тепловыделением.

#### Положения, выносимые на защиту

- 1. Результаты адаптации отражательного синтетического шлирен-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. предварительно Используемые методики тестировались, a результаты сравнивались с известными корреляциями. Достоверность полученных данных также публикацией результатов обусловлена 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, в подготовке и проведении всех представленных в работе экспериментов, в разработке и тестировании комплекса численных алгоритмов для анализа базы полученных экспериментальных данных, в обработке и анализе результатов, в подготовке статей для публикации в рецензируемых журналах и докладов на конференциях. Постановка задачи и основные методы исследования

сформулированы руководителем диссертационной работы чл.-корр. РАН, д.ф.м.н. Кабовым Олегом Александровичем.

Апробация результатов. Материалы диссертации были представлены на ведущих российских и международных конференциях: Всероссийской школеконференции 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 объём диссертации составляет 119 страниц с 77 рисунками и 5 таблицами. Список литературы содержит 130 наименований.

## СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Bo введении обоснована актуальность работы, определена цель И исследований, сформулированы научная поставлены задачи 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 можно сделать 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 двух специально разработанных на И взаимодополняющих экспериментальных стендах, основное отличие которых заключалось В

различном подводе тепла к подложке, на которой находился горизонтальный слой рабочей жидкости. Общая концепция экспериментальных стендов без уточнения способа нагрева представлена на Рисунке 1. Основной частью стендов открытые в атмосферу рабочие участки-кюветы, являются В которых формируется горизонтальная пленка жидкости, которая нагревается в центре и охлаждается по периферии. 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. Экспериментальный стенд с кондуктивным подводом тепла включает в себя два рабочих участка с внутренними диаметрами кювет 46 и 88 мм, в дно которых заподлицо встроены омически нагреваемые медные стержни круглого и квадратного сечения с размерами Ø 12 мм и 10 × 10 мм<sup>2</sup>, соответственно. На экспериментальном стенде с лазерным подводом тепла слой жидкости нагревается при помощи непрерывного лазера с диаметром луча около 3,5 мм, а для компенсации потерь рабочей жидкости, вызванных испарением, кювета соединяется с резервуаром по принципу сообщающихся сосудов.

На рабочие участки могут устанавливаться сменные подложки, что позволяет исследовать процесс термокапиллярного разрыва слоя жидкости на однородных поверхностях с контролируемыми свойствами при неизменных теплофизических свойствах системы. Исследования смачиваемости подложек были выполнены с использованием системы анализа формы капли DSA100 производства KRUSS. Анализ морфологии поверхности подложек осуществлялся с помощью сканирующего нанотвердомера NanoScan-3D.

В качестве рабочих жидкостей применялись сверхчистая вода Milli-Q, этанол а также силиконовые масла различной вязкости (ПМС-5, ПМС-100, ПМС-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 Micro-Epsilon IFC2451 используется контроллер с конфокальными хроматическими сенсорами IFS2405-0.3 и IFS2405-3. Конфокальный оптический сенсор установлен на платформу позиционного устройства и ориентирован перпендикулярно поверхности подложки. Позиционное устройство перемещается по двум осям вручную и по одной оси прецизионной которая управляется с ПК специальным микроподвижкой, программным обеспечением. Измерения толщины слоя жидкости могут осуществляться как в фиксированной точке, так и линейным перемещением сенсора подвижкой вдоль подложки.

Важным результатом представленного исследования является разработка метода, позволившего измерять динамическую толщину микропленок в процессе термокапиллярного разрыва горизонтальных слоев жидкости. При измерении жидких пленок на отражающих подложках конфокальный датчик имеет

ограничение по минимальной измеряемой толщине. По мере уменьшения толщины пленки сигналы от пленки и подложки сближаются и в итоге регистрируется только сигнал от подложки, что делает невозможным проведение дальнейших измерений. Измерение толщины микроразмерных пленок жидкости конфокальным сенсором стало возможным благодаря уменьшению коэффициента отражения поверхности подложки путем нанесения на нее специального черного покрытия, позволившего практически на два порядка уменьшить паразитный сигнал от подложки и, следовательно, обеспечить четкий сигнал от свободной поверхности пленки независимо от толщины слоя жидкости.



Рисунок 1 – Общая схема экспериментальной установки

Для визуализации деформации и разрыва горизонтального слоя жидкости применялась оптическая шлирен-система со скоростной видеокамерой. Данный метод позволяет получать изображения, интенсивность засветки которых зависит от угла наклона свободной поверхности. В зависимости от коэффициента отражения подложки могут реализовываться две оптические схемы шлиренметода основанные на отражении и на преломлении. Для обработки полученных в процессе эксперимента изображений был разработан алгоритм в среде Matlab. Программа анализирует шлирен-изображения в оттенках серого за счет бинаризации, а также анализа градиента. В результате на каждом кадре определяются области, соответствующие сухому пятну. Программа также автоматически определяет скорость контактной линии при распространении сухого пятна как изменение радиуса сухого пятна во времени.

Для измерения деформации свободной поверхности пленки жидкости в работе использовался адаптированный синтетический (фоновоориентированный) 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. Для измерения деформаций тонких слоев жидкости была произведена адаптация данного метода, которая заключалась в покрытии подложки специальным черным покрытием для минимизации отражения от ее поверхности света, что позволило обеспечить четкую визуализацию точечного рисунка, отраженного от свободной поверхности, даже для тонких пленок жидкости.

В третьей главе рассматривается динамика в тонком слое жидкости с неоднородным нагревом со стороны подложки.

*Раздел 3.1* посвящен изучению термокапиллярных деформаций, а также первичных микровозмущений свободной поверхности пленки жидкости, вызванных ее локальным нагревом.

На Рисунке 2 представлена эволюция восстановленного при помощи синтетического шлирен-метода трехмерного профиля свободной поверхности горизонтального слоя силиконового масла ПМС-100, на рабочем участке с нагревателем 10 × 10 мм<sup>2</sup>. Начальная толщина слоя составляла около 1,25 мм. Электрическая мощность, подводимая к нагревательному элементу, была постоянна и составляла 5 Вт, температура воды в контуре термостабилизации периметра кюветы составляла 23°С. В первые секунды после начала нагрева над нагревателем образуется выпуклая деформация величиной около 1 мкм. Данный эффект связан с тем, что нижние слои жидкости над нагревателем прогреваются быстрее, вследствие чего расширяются и вызывают положительные деформации свободной поверхности. Затем в верхней части выпуклости образуется углубление, формирующее валы жидкости, которые смещаются к периферии по мере развития вогнутой деформации (Рисунок 2). Возникновение валов жидкости в процессе эволюции термокапиллярной деформации, вызванной локальным нагревом слоя жидкости, предсказывается численной моделью [10] и объясняется движением жидкости от центра к периферии. Данная модель также предсказывает отсутствие валов в стационарных условиях. Также стоит отметить, что по сравнению с развитием вогнутой (отрицательной) деформации, процесс роста положительной деформации развивается очень быстро в течение нескольких секунд после начала нагрева.

Для верификации результатов измерения трёхмерного профиля слоя жидкости, данные, полученные при помощи синтетического шлирен-метода, сравнивались с локальными измерениями толщины слоя жидкости в центре кюветы конфокальным методом.

В *разделе 3.2* представлены результаты экспериментальных исследований образования остаточной пленки при термокапиллярном разрыве горизонтального слоя неподвижной жидкости, а также приведены обобщение и анализ полученных данных для различных рабочих жидкостей, описывающие механизм данного явления.



Рисунок 2 – Профили свободной поверхности пленки в разное время после начала нагрева

Эксперименты проводились на рабочем участке с медным нагревателем диаметром 12 мм, при этом температура воды в контуре термостабилизации периметра кюветы составляла 5°С. Поверхность рабочего участка покрывалась специальным черным покрытием, что делает возможным измерение сверхтонких пленок жидкости конфокальным методом. В экспериментах реализовывались два сценария нагрева слоя жидкости, в первом случае пленка жидкости нагревалась резко (мощность нагрева составляла 75 Вт), во втором случае пленка жидкости нагревалась медленно (мощность нагрева увеличивалась плавно) с шагом не более 5% от пороговой мощности нагрева, при которой происходит разрыв). При резком и медленном нагреве температура поверхности медного стержня увеличивалась примерно на 2,5 и 0,02°С в секунду соответственно. В качестве рабочей жидкости использовались сверхчистая вода Milli-Q и силиконовые масла (PMS-5, PMS-100 и PMS-200). Начальная толщина слоя жидкости в центре кюветы варьировалась от 400 до 700 мкм. На Рисунке 3 представлена

последовательность шлирен-изображений деформаций свободной поверхности и разрыва пленки воды в процессе ее локального нагрева со стороны подложки (мощность нагрева 75 Вт). На изображениях, полученных шлирен-методом, плоская горизонтальная поверхность пленки жидкости - белая, а поверхность, наклоненная к горизонту, - темная. Без нагрева пленка жидкости в исследуемой области плоская (Рисунок 3, изображение 1). После начала нагрева свободная поверхность деформируется с образованием над нагревателем углубления, которое развивается с увеличением градиента температуры по мере прогрева пленки. После достижения максимального углубления (Рисунок 3, изображение 4), движущийся фронт жидкости образует на нагревателе остаточную пленку, которая, как видно из шлирен-изображений, практически плоская (Рисунок 3, изображение 5). Затем сплошная остаточная пленка рвется, образуя сухое пятно (Рисунок 3, изображение 6). Характерное изменение локальной толщины пленки над нагревателем в процессе развития термокапиллярного углубления показано на Рисунке 4. Видно, что сначала пленка резко утончается вплоть до остаточной пленки толщиной около 10 мкм. Красная линия на Рисунке 4 – зависимость температуры поверхности нагревателя от времени после начала нагрева.



положение нагревательного стержня

Предполагается, что явление остаточной пленки обусловлено вязким трением в жидкости, которое препятствует движению жидкости из зоны нагрева и тем самым противодействует разрыву пленки. Для оценки влияния вязкого трения на образование остаточной пленки в качестве рабочих жидкостей использовались силиконовые масла ПМС (полиметилсилоксаны) с различной вязкостью, поскольку они обладают практически одинаковыми физическими свойствами при широком диапазоне вязкости.

В результате исследования было получено, что толщина остаточной пленки сильно зависит от вязкости жидкости: для воды толщина остаточной пленки составляет около 10 мкм, в то время как для силиконового масла ПМС-200 - около 275 мкм.

Для исследования влияния скорости нагрева на толщину остаточной пленки были проведены эксперименты с медленным нагревом горизонтальных пленок силиконовых масел. Установлено, что при уменьшении скорости нагрева от 2,5 до 0,02°C в секунду толщина остаточной пленки уменьшается примерно в 3 раза. Эффект влияния скорости нагрева на толщину остаточной пленки объясняется тем, что при медленном нагреве жидкость имеет больше времени для оттекания из области нагрева (время эксперимента при медленном нагреве более чем в 50 раз больше, чем при резком).



Рисунок 4 – Толщина пленки над нагревателем и температура нагревателя в процессе термокапиллярного разрыва слоя воды. Измерение проводилось в точке, указанной на Рисунке 3, начальная толщина пленки 400 мкм, мощность нагрева 75 Вт

Экспериментальные данные по толщине остаточной пленки были обобщены следующим образом. Толщина остаточной пленки h масштабируется начальной толщиной слоя жидкости  $h_0$  и представляется как степенная функция капиллярного числа. Капиллярное число

$$Ca = \mu U / \sigma \tag{1}$$

- безразмерная величина, представляющая отношение сил вязкого трения и сил поверхностного натяжения, действующих на границе раздела газ-жидкость, где  $\mu$  – динамическая вязкость жидкости, U – характеристическая скорость, а  $\sigma$  – поверхностное натяжение. В качестве характерной скорости использовалась скорость фронта жидкости при образовании остаточной пленки. Свойства жидкости брались при  $T_0 = 25^{\circ}$ С. Скорость фронта жидкости измерялась по шлирен-изображениям. Используя экспериментальные данные для различных рабочих жидкостей, была получена следующая корреляция (Рисунок 5)

$$h_{res}/h_0 = 27,9Ca^{0.64}$$
. (2)

Поскольку механизм движения жидкости относительно твердого тела встречается во многих задачах гидродинамики, целесообразно сравнить полученные результаты по толщине остаточной пленки с некоторыми родственными задачами гидродинамики. Одной из таких задач является задача Ландау–Левича описывающая течение, создаваемое пластиной, извлекаемой из объема жидкости с определенной скоростью U. При этом, исходя из предположения, что силы вязкости, тяжести и поверхностного натяжения находятся в равновесии, Ландау и Левич (Landau and Levich, 1942) теоретически получили толщину увлекаемой пластиной пленки  $h_{\infty}$  как

$$h_{\infty}/l_{\sigma} = 0.9458 \, Ca^{2/3},\tag{3}$$

где  $l_{\sigma} = (\sigma/\rho g)^{1/2}$  – капиллярная длина,  $\rho$  – плотность жидкости, g – ускорение свободного падения.



Рисунок 5 – Обобщение данных по толщине остаточной пленки

Течение Ландау-Левича тесно связано с задачей Бретертона, где рассматривается движение газового пузыря в трубке с жидкостью (Bretherton, 1961). Бретертон обнаружил, что параметром, определяющим задействованную физику, является капиллярное число Ca, которое выражает взаимосвязь между скоростью пузырька, поверхностным натяжением и вязкостью жидкости. Толщина пленки b, образованной газовым пузырем, движущимся со скоростью U по трубе радиуса r, выражается как

$$b/r = 0.643(3Ca)^{2/3}$$
. (4)

Из уравнений (3 и 4) видно, что, несмотря на разные условия формирования тонкой пленки на твердой стенке, толщина пленки подчиняется одному и тому же степенному закону  $Ca^{2/3}$ , при этом полученный в нашем обобщении уравнение (2) показатель степени равный 0,64 очень близок к 2/3. Таким образом, можно сделать вывод, что образование остаточной пленки с точки зрения физики аналогично образованию тонкой пленки в задачах Ландау -Левича и Бретертона и обусловлено движением жидкости относительно подложки.

В четвертой главе приведены результаты систематических экспериментальных исследований влияния шероховатости и смачиваемости

подложки на процесс термокапиллярного разрыва горизонтального локально нагреваемого снизу слоя жидкости.

представлены разделе 4.1 результаты B 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. Для исследования влияния термокапиллярного поверхности шероховатости на процесс разрыва использовались подложки, представляющие собой диски из нержавеющей стали диаметром 51 мм и толщиной 1 мм различной шероховатости, которые кондуктивно нагревалась в центре медным нагревателем диаметром 12 мм. Для исследования влияния смачиваемости поверхности на процесс термокапиллярного разрыва горизонтального слоя жидкости применялись нагреваемые снизу лазером кремниевые подложки (толщиной 0,5 мм и диаметром 25 мм), в том числе с нанопокрытиями, изменяющими краевой угол смачивания. В качестве рабочей жидкости использовалась сверхчистая вода Milli-Q. Начальная толщина пленки жидкости варьировалась от 300 до 1100 мкм на рабочем участке с кондутивным подводом тепла и от 200 до 600 мкм на рабочем участке с лазерным нагревом. В ходе эксперимента мощность нагрева плавно увеличивалась с шагом, не превышающим значение 5% от мощности, при которой происходит установления стационарного разрыв слоя, до термокапиллярного течения жидкости в пленке, при этом температура воды в контуре термостабилизации периметра кюветы составляла 23-24°С.



Рисунок 6 – Поле температур на свободной поверхности пленки воды  $(h_0 = 600 \text{ мкм})$ , измеренное перед разрывом

В результате исследований влияния смачиваемости подложки в широком диапазоне краевых углов смачивания, а также влияния шероховатости на пороговую разницу температур не обнаружено.

Диапазон тепловых поток, 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/см<sup>2</sup>, и от 1,5, до 12,3 Вт/см<sup>2</sup> на рабочем участке с лазерным нагревом для разрыва пленок жидкости толщиной 200-600 мкм.

Исследования показали, ЧТО с увеличением начальной толщины жидкости возрастает горизонтального слоя разница температур между нагревателем и холодильником, необходимая для разрыва слоя. Полученный результат согласуется с теоретическими работами (Marchuk, 2009; Tan et al., 1990). 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 увеличивается И гидростатическая жидкости, сила, препятствующая возникновению в пленке перепада толщин, следовательно, для разрыва слоя необходим больший градиент температуры.

увеличением толщины слоя жидкости увеличивается С разность температур, необходимая для разрыва, однако для различных рабочих жидкостей полученные зависимости не совпадают (для более вязких жидкостей линии зависимости лежат выше). Для получения единой корреляционной зависимости, учитывающей свойства рабочих жидкостей, а также условия нагрева, данные по термокапиллярному разрыву горизонтального слоя жидкости представлены на Рисунке 7 в координатах ( $Ma_{cr}; h_{per}/l_{\delta}$ ), где Ма<sub>сг</sub> – критическое число Марангони, определяемое при пороговой разнице температур между нагревателем и холодильником  $\Delta T_{cr}$ ,  $h_{per}$  – толщина слоя (для более корректного учета эффекта испарения, а также эффекта вытеснения жидкости из центра кюветы к периферии, в качестве характерной толщины слоя берется толщина слоя перед разрывом на периферии кюветы),  $l_{\delta}$  – масштаб устойчивости пленки (м), впервые предложенный Хартли и Мергатройдом (Hartley and Murgatroyd, 1964) для стекающих пленок жидкости, определяемый как

$$l_{\delta} = \left(\sigma \mu^2 / \rho^3 g^2\right)^{1/5} \tag{5}$$

где  $\sigma$  – поверхностное натяжение,  $\mu$  – динамическая вязкость жидкости, g – ускорение свободного падения,  $\rho$  – плотность жидкости. Свойства жидкости брались при  $T_0 = 25^{\circ}$ С.

Исходя из вышесказанного, данные полученные автором в различных условиях эксперимента (разделы 3.2, 4.1), а также данные теоретических и экспериментальных работ других авторов (Burelbach et al., 1990; Pshenichnikov and Tokmenina, 1983) можно обобщить единой зависимостью (Рисунок 7)

$$Ma_{cr} = 11665 (h_{per}/l_{\delta})^{2,4}.$$
 (6)

Соотношение (6) удовлетворительно обобщает данные для разных условий эксперимента, а также рабочих жидкостей, свойства которых изменяются в широком диапазоне. Таким образом, полученная зависимость отражает факт конкуренции эффекта Марангони, определяемого градиентом температуры, а также гидростатической силы, определяемой толщиной слоя жидкости.

Раздел 4.2 посвящен динамике контактной линии в процессе роста сухого различной шероховатости смачиваемости. пятна на подложках И Представленные в данном разделе данные описывают динамику сухого пятна в процессе термокапиллярного разрыва слоя жидкости на подложках различной шероховатости и смачиваемости и получены в ходе тех же экспериментов, что и данные. представленные в разделе 4.1., где отмечается, ЧТО изменение шероховатости смачиваемости или подложки не влияет на процесс термокапиллярного разрыва горизонтального слоя жидкости до стадии формирования остаточной пленки, в которой зарождается сухое пятно.



Рисунок 7 – Данные по термокапиллярному разрыву горизонтального слоя жидкости в различных условиях. 1 – вода, диаметр нагревателя 3,5 мм (супергидрофобная поверхность); 2,3 – вода, диаметр нагревателя 3,5 мм (гидрофильная поверхность); 4 – вода, диаметр нагревателя 12 мм; 5 – Силиконовое масло ПМС 100, диаметр нагревателя 12 мм (резкий нагрев); 6 – Силиконовое масло ПМС 100, диаметр нагревателя 12 мм; 7 – Силиконовое масло ПМС 5, диаметр нагревателя 12 мм; 8 - Силиконовое масло ПМС 200, диаметр нагревателя 12 мм; 9 – Силиконовое масло ПМС 5, диаметр нагревателя 2 мм (резкий нагрев); 10 – Силиконовое масло ПМС 200, диаметр нагревателя 2 мм (резкий нагрев); 11 – силиконовое масло (Burelbach et al., 1990); 12 – этанол (Пшеничников и Токменина, 1983); 13 – этанол, диаметр нагревателя 12 мм

На Рисунке 8 представлена динамика роста сухого пятна в горизонтальном слое воды на «гладкой» подложке из нержавеющей стали со среднеквадратичной шероховатостью rms = 4 нм. Черные участки соответствуют наклоненной относительно горизонта границе раздела жидкость-газ, серые — плоскому остаточному слою, самые светлые — подложке без жидкости (сухое пятно). При термокапиллярном разрыве горизонтального слоя воды на гладкой поверхности сухое пятно образуется как точечное отверстие в остаточной пленке (серая область в центре изображения). Далее единственное сухое пятно быстро распространяется почти по всей поверхности подложки. Среднюю скорость линии контакта в процессе роста сухого пятна (Рисунок 9) определяли с помощью обработки изображений как разность радиусов сухого пятна во времени. Скорость контактной линии максимальна сразу после разрыва, а затем уменьшается. Следует отметить, что с увеличением начальной толщины пленки увеличивается скорость линии контакта в момент зарождения сухого пятна. Однако на заключительном этапе разрыва скорость линии контакта становится ниже для более толстых пленок, вследствие большей гидростатической силы, препятствующей образованию сухого пятна.



Рисунок 8 – Последовательность шлирен-изображений, демонстрирующих динамику роста сухого пятна в горизонтальном слое воды. Начальная толщина пленки 850 мкм. Круг указывает положение медного нагревателя диаметром 12 мм, внизу указано время от зарождения сухого пятна

На Рисунке 10 представлена динамика сухого пятна в горизонтальном слое воды на «шероховатой» подложке из нержавеющей стали со среднеквадратичной шероховатостью rms =175 нм. В отличие от термокапиллярного разрыва слоя воды на «гладкой» подложке, где сухое пятно возникает как точечное отверстие недалеко от центра остаточной пленки, разрыв слоя воды на «шероховатой» подложке начинается на краю остаточной пленки, в результате чего образуется сухое пятно кольцеобразной формы (Рисунок 10, изображение 1). По сравнению с динамикой сухого пятна в слое воды на гладкой подложке, скорость роста сухого пятна в слое воды на шероховатой подложке на несколько порядков ниже (Рисунок 11).



Рисунок 9 – Динамика контактной линии во время роста сухого пятна в горизонтальном слое воды на «гладкой» стальной подложке



Рисунок 10 – Последовательность изображений, демонстрирующая динамику разрыва пленки воды на шероховатой подложке. Показано время от зарождения сухого пятна. Круг указывает положение нагревательного стержня (диаметр 12 мм)

Поскольку шероховатость поверхности влияет на краевой VГОЛ смачивания, оставалось неясным, что вносит больший вклад в динамику сухого пятна – морфология поверхности или смачиваемость. Для определения влияния морфологии поверхности на динамику контактной линии при росте сухого пятна, были проведены эксперименты с использованием этанола в качестве рабочей жидкости, поскольку краевой угол смачивания этанолом как гладкой, так и шероховатой подложки из нержавеющей стали близок к нулю. Рассмотрим процесс роста сухого пятна в слое этанола на «шероховатой» и «гладкой» подложке (Рисунок 12). В слое этанола, как на «гладкой», так и на «шероховатой» подложке сухое пятно образуется на краю остаточной пленки и имеет кольцеобразную форму (пока остаточная пленка не испарится). Было

обнаружено, что скорость контактной линии при распространении сухого пятна в слое этанола (Рисунок 13) практически не зависит от шероховатости поверхности, так как этанол хорошо смачивает как «гладкую», так И «шероховатую» подложку. Таким образом, можно сделать вывод, что шероховатость поверхности влияет на динамику контактной линии через изменение смачиваемости стальной подложки (уменьшая оттекающий краевой эффекта при ЭТОМ значительного непосредственно морфологии угол), поверхности на процесс роста сухого пятна не наблюдается.



Рисунок 11 – Динамика контактной линии в процессе роста сухого пятна в горизонтальном слое воды на «шероховатой» подложке



Рисунок 12 – Последовательность шлирен-изображений, демонстрирующая динамику разрыва пленки этанола на гладкой (*a*) и шероховатой подложке (*б*). Внизу показано время от зарождения сухого пятна. Круг указывает положение нагревателя диаметром 12 мм.



Рисунок 13 – Динамика контактной линии в процессе роста сухого пятна в горизонтальном слое этанола на «гладкой» и «шероховатой» подложке

На Рисунке 14 представлены шлирен-изображения, демонстрирующие распространение сухого пятна в процессе термокапиллярного разрыва горизонтального слоя воды на подложках различной смачиваемости.



Рисунок 14 – Динамика сухого пятна на кремниевой подложке (*a*), а также на кремниевой подложке с фторполимерным нанопокрытием (б) (время указано от зарождения сухого пятна)

На всех рассматриваемых в данном разделе кремниевых подложках сухое пятно образуется как точечное отверстие в случайном месте остаточной пленки, которое затем распространяется практически по всей подложке. На Рисунке 15 представлены графики зависимости скорости линии контакта от радиуса сухого пятна при разной начальной толщине слоя воды на кремниевых подложках с различным краевым углом смачивания. Из графика видно, что вне зависимости от начальной толщины слоя жидкости и смачиваемости подложки скорость контактной линии имеет максимальное значение при практически минимальном радиусе сухого пятна (зародившегося в остаточной пленке), и уменьшается по мере удаления контактной линии от центра кюветы. Уменьшение скорости контактной линии в процессе роста сухого пятна связано с увеличением толщины деформированного слоя жидкости от центра кюветы к периферии, таким образом, по мере удаления границы сухого пятна от центра подложки гидростатическое давление, которое препятствует увеличивается распространению сухого пятна, что согласуется с результатами, полученными на другом рабочем участке (Рисунок 9), а также в работе (Bankoff et al., 2003), где исследовался рост сухого пятна в изотермическом слое жидкости. Стоит отметить, что поскольку сухое пятно образуется почти в центре подложки и распространяется симметрично, радиус сухого пятна практически эквивалентен координате от центра кюветы.

Также установлено, что с увеличением начальной толщины слоя воды максимальная скорость линии контакта увеличивается. Однако по мере удаления границы сухого пятна от центра подложи, скорость линии контакта уменьшается быстрее для более толстых пленок жидкости и при некотором радиусе сухого пятна (2-4 мм) становится меньше для более толстых пленок жидкости, что также связано с большей гидростатической силой, препятствующей росту сухого пятна. Данная тенденция наблюдается на всех кремниевых подложках с разными краевыми углами смачивания.



Рисунок 15 – Скорость линии контакта при росте сухого пятна на подложках различной смачиваемости.  $\theta_{ad} = 41^{\circ}$ ,  $\theta_{rec} = 7,5^{\circ}$  (*a*);  $\theta_{ad} = 124^{\circ}$ ,  $\theta_{rec} = 93^{\circ}$  (*б*)

Процесс роста сухого пятна при термокапиллярном разрыве горизонтального разделить слоя жидкости можно стадии: на две 1) распространение сухого пятна в остаточной пленке постоянной толщины; 2) распространение сухого пятна в деформированном слое жидкости. При этом вне зависимости от смачиваемости подложек скорость контакта линии минимальном радиусе максимальна при практически сухого пятна. зародившегося в остаточной пленке, и уменьшается по мере удаления контактной линии от центра кюветы. Все вышесказанное справедливо для сухих пятен, зарождающихся в виде точечного отверстия недалеко от центра остаточной пленки. На Рисунке 16 представлена зависимость скорости линии контакта от радиуса сухого пятна на кремниевых подложках с различными краевыми углами смачивания при одной и той же начальной толщине слоя воды  $h_0 = 400$  мкм. Поскольку, как показано в Разделе 4.1, свойства поверхности подложки не оказывают существенного влияния на разницу температур между нагревателем и холодильником, необходимую для термокапиллярного разрыва горизонтального слоя жидкости, справедливо полагать, что условия в пленке жидкости до момента образования сухого пятна на кремниевых подложках различной смачиваемости существенно не отличаются. Также на графике представлена зависимость скорости линии контакта от радиуса сухого пятна на полированной подложке из нержавеющей стали при средней начальной толщине слоя воды  $h_{av0} = 400$  мкм. Как видно из Рисунка 16 с увеличением краевого угла смачивания скорость линии контакта значительно увеличивается на всех стадиях роста сухого пятна. Причем влияние смачиваемости наиболее ярко выражено на начальном этапе роста сухого пятна.



Рисунок 16 – Динамика линии контакта на подложках различной смачиваемости при начальной толщине слоя воды *h*<sub>0</sub> = 400 мкм

Поскольку на первом этапе распространение сухого пятна происходит в практически плоской остаточной пленке толщиной ~ 10 мкм, уместно сравнить полученные данные с данными (Redon et al., 1991), где сухое пятно распространяется в изотермических пленках жидкости толщиной 20-50 мкм, а результаты экспериментов находятся в хорошем согласии с гидродинамической теорией, описывающей данный процесс и предсказывающей  $V_{cl} \sim \theta^3$ . Данные по скорости линии контакта в начальный момент образования сухого пятна в остаточной пленке, а также данные (Redon et al., 1991) представлены на Рисунке 17 в виде зависимости капиллярного числа  $V/V^*$  (где  $V^* = \sigma/\mu$ ) от краевого угла смачивания в кубе  $\theta^3$ . Данные по динамике сухого пятна в остаточной пленке для среднего диапазона краевых углов смачивания подложки хорошо описываются следующим соотношением

$$V_{cl} / V^* = 0,002 \cdot \theta_{rec}^3 \tag{7}$$

где  $\theta_{rec}$  отступающий краевой угол смачивания (ввиду того, что при термокапиллярном разрыве фронт жидкости оттекает из области нагрева, в качестве характерного краевого угла смачивания целесообразно использовать отступающий контактный угол смачивания). Также на график нанесены данные по скорости контактной линии в микрослое при кипении воды в большом объеме при различных тепловых потоках (35-890 кВт/м<sup>2</sup>) (Surtaev et al., 2018) (свойства жидкости брались при температуре насыщения).

Таким образом, несмотря на различную причину разрыва микроразмерных пленок жидкости динамика линии контакта подчиняется зависимости  $V_{cl} \sim \theta^3$ .



Рисунок 17 – Обобщение данных по скорости контактной линии на этапе роста сухого пятна в остаточной пленке, а также данные из литературы

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. При помощи адаптированного отражательного синтетического шлирен 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 изменяется в 200 раз.

4. 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  $Ma_{cr} = 11665(h_{per}/l_{\delta})^{2,4}$ .

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, находящегося в парогазовой среде.

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  $V_{cl}/V^* = 0,002 \cdot \theta_{rec}^3$ .

### Основные публикации по теме диссертации в журналах из перечня ВАК:

1. Kochkin D.Y., Mungalov A.S., Zaitsev D.V., Kabov O.A. 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. – Vol. 133, Article No. – 110576.

2. Zaitsev D.V., Kochkin D.Y., Kabov O.A. Dynamics of liquid film rupture under local heating // International Journal of Heat and Mass Transfer. – 2022. – Vol. 184, Article No. – 122376.

3. Kochkin D.Y., Zaitsev D.V., Kabov O.A. Thermocapillary rupture and contact line dynamics in the heated liquid layers // Interfacial Phenomena and Heat Transfer. – 2020. – Vol. 8, – P. 1-9.

4. Kochkin D.Y., Arkhipov V.E., Zaitsev D.V., Frolov L.B., Kabov O.A. Wettability of Graphene-Coated Copper Substrates // AIP Conference Proceedings. – 2021. – Vol. 2337, Article No. – 020008.

5. Shebelev A.V., Minakov A.V., Kochkin D.Y., Kabov O.A. Numerical simulation of the formation of dry spots during film evaporation // Journal of Physics: Conference Series. -2021. - Vol. 2119, Article No. -012086.

6. Kochkin D.Y., Bogoslovtseva A.L., Kabov O.A. Contact line dynamics on a substrate coated with a fluoropolymer // Journal of Physics: Conference Series. – 2021. – Vol. 2119, Article No. – 012132.

7. Kochkin D.Y. Dynamics of the contact line on a non-uniformly heated silicon substrate // AIP Conference Proceedings. -2021. - Vol. 2422, Article No. -040010.

8. Kochkin D.Y., Zaitsev D.V., Kabov O.A. The effect of the heating rate on the rupture dynamics of the horizontal layer of silicone oil // Journal of Physics: Conference Series. -2020. - Vol. 1675, Article No. -012053.

9. Kochkin D.Y., Kurenya A.G., Zaitsev D.V., Kabov O.A. Experimental study of the wettability of silicon substrates coated with vertically oriented carbon nanotubes // Journal of Physics: Conference Series. – 2020. – Vol. 1677, Article No. – 012088.

10. Kochkin D.Y., Zaitsev D.V., Mungalov A.S., Kabov O.A. Experimental study of the thermocapillary rupture dynamics of water and ethanol layers // Journal of Physics: Conference Series. – 2020. – Vol. 1677, Article No. – 012137.

11. Kochkin D.Y. Dynamics of the contact line in heated liquid layers // AIP Conference Proceedings. – 2019. – Vol. 2135, Article No. – 020029.

12. Kochkin D.Y., Zaitsev D.V., Kabov O.A. The effect of viscosity on rupture dynamics in the non-uniformly heated horizontal liquid film // Journal of Physics: Conference Series. -2019. - Vol. 1369, Article No. -012057.

13. Kochkin D.Y. The effect of evaporation on a horizontal liquid film rupture // Journal of Physics: Conference Series. – 2019. – Vol. 1382, Article No. – 012110.

14. Kochkin D.Y., Belosludtsev V.V., Sulyaeva V.S. Thermocapillary rupture of a horizontal liquid layer on a silicon substrate // EPJ Web of Conferences. – 2019. – Vol. 196, Article No. – 00041.

15. Barakhovskaia E.V., Spesivtsev S.E., Kochkin D.Y. Experimental investigation and numerical modeling of destruction dynamics of thin silicone oil layers under the local heating // Journal of Physics: Conference Series. -2018. - Vol. 1105, Article No. -012083.

16. Kochkin, D.Y. Experimental study of the effect of the substrate roughness on the thermocapillary breakdown of a horizontal liquid film // MATEC Web of Conferences. -2017. - Vol. 110, Article No. -01040.

17. Kochkin D.Y., Sulyaeva V.S. Effect of heat conductivity and thickness of substrate on thermocapillary rupture of locally heated horizontal liquid film // EPJ Web of Conferences. -2017. - Vol. 159, Article No. -0023.

18. Kochkin D.Y, An experimental study of thermocapillary rupture of a locally heated horizontal liquid layer on various substrates // MATEC Web of Conferences. -2016. - Vol. 92, Article No. -01043.