



МАЛЮК Александр Юрьевич

**ИЗУЧЕНИЕ ТЕПЛОВОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ ЛАЗЕРНОГО
ИЗЛУЧЕНИЯ НА СИДЯЧИЕ КАПЛИ И ТОНКИЕ ПЛЕНКИ ЖИДКОСТИ
ДЛЯ РАЗРАБОТКИ АДАПТИВНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ ОПТИКИ**

**Специальность 01.04.14 Теплофизика
и теоретическая теплотехника**

АВТОРЕФЕРАТ

**диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук**

Работа выполнена в Федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Тюменский государственный университет» (ФГАОУ ВО «ТюмГУ»).

Научный руководитель

Иванова Наталья Анатольевна,
кандидат физико-математических наук,
доцент

Официальные оппоненты

Чиннов Евгений Анатольевич,
доктор физико-математических наук,
ФГБУН «Институт теплофизики
им. С.С. Кутателадзе СО РАН»,
главный научный сотрудник лаборатории
интенсификации процессов теплообмена

Мизёв Алексей Иванович,
доктор физико-математических наук,
ФГБУН «Институт механики сплошных
сред УрО РАН» – филиал ФГБУН
«Пермский федеральный
исследовательский центр УрО РАН»,
заведующий лабораторией
гидродинамической устойчивости

Ведущая организация

ФГБУН «Федеральный исследовательский
центр «Казанский научный центр
Российской академии наук»

Защита состоится 5 декабря 2019 г. в 12-30 часов на заседании диссертационного совета Д212.274.10 при ФГАОУ ВО «Тюменский государственный университет» по адресу: 625003, г. Тюмень, ул. Перекопская 15а, ауд. 410.

Тел.: +79324774102
e-mail: a.malyuk@utmn.ru

С диссертацией можно ознакомиться в Информационно-библиотечном центре ФГАОУ ВО «Тюменский государственный университет» и на сайте <https://diss.utmn.ru/sovet/diss-sovet-212-274-10/zashchita/781303/>

Автореферат разослан «___» октября 2019 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета Д 212.274.10
д. ф.-м. н.



Удовиченко С.Ю.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность исследования

Миниатюрные оптические элементы стали неотъемлемой частью современных систем медицинской диагностики, сенсорной техники, устройств оптической связи. Основными требованиями, предъявляемыми к таким элементам, состоящим из набора подвижных линз, являются способность перестраивать рабочие характеристики в реальном времени для выполнения поставленной задачи и адаптироваться к изменениям окружения. Однако, такие оптические системы зачастую имеют недостатки, связанные с низкой надежностью движущихся частей, медленного срабатывания, уменьшения диапазона перестройки фокуса и светосилы. Одним из решений данной проблемы является замена твердотельных линз на жидкие варифокальные линзы, изменяющие форму преломляющей поверхности (границы раздела фаз жидкость-воздух, жидкость-жидкость) в ответ на внешние стимулы. Помимо прочих физических эффектов (электросмачивание [58-62], диэлектрофорез [65-68]) перспективной основой для создания жидких адаптивных линз является конвекция Марангони в микрообъемах жидкости, вызываемая локальным тепловым потоком, который позволяет динамически управлять формой преломляющей межфазной поверхности, изменяя параметры оптического элемента. Известно, что конвекция Марангони может быть вызвана как градиентом температуры (термокапиллярная конвекция), так и градиентом концентрации (концентрационно-капиллярная конвекция). На сегодняшний день относительно изученной является только термокапиллярная конвекция в тонких слоях чистых жидкостей, и практически отсутствуют работы о термо- и концентрационно-капиллярной конвекции в сидячих каплях жидкости при локальном воздействии источника тепла. В связи с этим для разработки оптических элементов на основе эффектов Марангони требуется всестороннее изучение процессов тепломассопереноса в каплях и тонких слоях жидкостей и бинарных смесей при локализованном тепловом воздействии лазерного излучения.

Цель и задачи исследования

Целью является экспериментальное и численное исследование влияния локализованного теплового потока на форму границы раздела фаз жидкость-воздух в сидячих каплях жидкости при термокапиллярной конвекции и тонких пленках жидкости при концентрационно-капиллярной конвекции.

Для достижения указанной цели необходимо решить следующие научные задачи:

1. Разработать физико-математическую модель термокапиллярной конвекции возбуждаемой в сидячей капле жидкости с помощью теплового воздействия лазерного излучения.

2. Разработать экспериментальную методику измерения кривизны межфазной поверхности жидкости при термо- и концентрационно-капиллярной конвекции, возбуждаемой тепловым воздействием лазерного излучения.

3. Экспериментально изучить влияние теплового потока на изменение формы свободной поверхности сидячих капель жидкости при термокапиллярной конвекции.

4. Экспериментально изучить влияние теплового потока на изменение формы межфазной границы слоя бинарной жидкой смеси при термоиндуцированной концентрационно-капиллярной конвекции.

5. Изучить возможность применения термо- и концентрационно-капиллярной конвекции, возбуждаемой тепловым действием лазерного излучения в микрообъемах жидкости для разработки жидких варифокальных линз.

Научная новизна изложенных в диссертационной работе результатов заключается в следующем:

1. Впервые разработана физико-математическая модель термокапиллярной конвекции, вызываемой локализованным потоком тепла в сидячей капле малолетучей жидкости со свободной межфазной поверхностью и неподвижной линией трехфазного контакта и выполнено численное исследование задачи.

2. Впервые экспериментально исследована термокапиллярная конвекция, возбуждаемая тепловым действием лазерного излучения в сидячей капле малолетучей жидкости с неподвижной линией трехфазного контакта. Впервые обнаружен эффект изменения формы с выпуклой на вогнутую межфазной поверхности капли при действии локализованного теплового потока, а также предложена методика измерения кривизны межфазной границы капли при изменении мощности теплового потока.

3. Экспериментально исследовано влияние мощности локализованного теплового потока на форму межфазной границы при концентрационно-капиллярной конвекции в тонких слоях двухкомпонентных растворов при различных концентрациях компонентов. Изучено влияние мощности теплового потока на время формирования и релаксации капли концентрационно-капиллярным механизмом. Исследованы границы устойчивости сформированной капли в зависимости от угла наклона к горизонту при различных мощностях теплового потока.

4. Впервые предложены жидкостные элементы оптики на основе термокапиллярной и термо-индуцированной концентрационно-капиллярной конвекций, которые позволяют динамически изменять в широком интервале значений фокусное расстояние преломляющей поверхности, и могут быть использованы в режимах плоско-выпуклой и плоско-вогнутой тороидальной линзы.

Основные положения, выносимые на защиту:

1. Результаты экспериментального исследования термокапиллярной конвекции, вызванной локализованным тепловым потоком в сидячей капле малолетучей жидкости с неподвижной границей трехфазного контакта в зависимости от мощности теплового потока.

2. Физико-математическая модель термокапиллярной конвекции, вызванной локализованным потоком тепла в сидячей капле малолетучей жидкости со свободной межфазной поверхностью и неподвижной линией трехфазного контакта и результаты численного исследования задачи.

3. Результаты экспериментального исследования концентрационно-капиллярной конвекции, вызванной локализованным тепловым потоком в тонких слоях бинарных растворов и влияния мощности теплового потока на форму свободной поверхности и время ее формирования и релаксации.

4. Прототипы жидкостных оптических элементов на основе термо- и концентрационно-капиллярной конвекции, вызываемой тепловым действием лазерного излучения.

Практическая значимость работы состоит в следующем:

Получены фундаментальные знания о термокапиллярной конвекции в сидячих каплях жидкости с неподвижной линией трехфазного контакта и влиянии мощности локализованного теплового потока на форму свободной поверхности. Получены фундаментальные знания о концентрационно-капиллярной конвекции, вызванной локализованным тепловым потоком в тонких слоях бинарных растворов, и зависимости формы свободной поверхности от мощности теплового потока, концентрации компонент раствора.

Предложены жидкостные оптические элементы на основе капиллярной конвекции Марангони, которые могут быть использованы для усовершенствования или создания новых оптических систем и устройств, обладающих рядом преимуществ, по сравнению с существующими. На оптический элемент на основе термокапиллярной конвекции получен патент (см. приложение 1).

Разработанные математические модели могут быть использованы для проектирования жидкостных оптических элементов на основе термокапиллярной конвекции в сидячей капле.

Достоверность полученных результатов и выводов обеспечивается использованием современного измерительного оборудования и компьютерной техники, фундаментальных уравнений гидродинамики и теплофизики, количественной и качественной корреляцией численных результатов с результатами натуральных экспериментов. Описанные экспериментальные данные обладают высокой воспроизводимостью и согласуются с данными в других научных источниках.

Личный вклад автора в исследование состоит в разработке экспериментальной установки и конструировании отдельных ее элементов, проведении экспериментальных исследований, обработке данных, разработке и реализации математических моделей термокапиллярной конвекции в капле, подготовке статей для публикации в рецензируемых журналах и докладов для представления результатов на конференциях.

Автор выражает огромную признательность своему научному руководителю, кандидату физ.-мат. наук, доценту Ивановой Н.А. за всестороннюю поддержку на протяжении всего времени проведения исследований и воспитании исследовательских навыков в научной деятельности.

Апробация работы

Основные результаты работы докладывались и обсуждались на следующих международных конференциях:

- 3th International School and Conference "Saint-Petersburg OPEN 2016" (Saint-Petersburg, Russian Federation, 2016),
- Optics and Photonics Conference «Photon16» (Leeds, United Kingdom, 2016),
- World of Photonics Congress, EOS on Optical Technologies, 4th Conference on Optofluidics (Munich, Germany, 2017),
- 7th International Workshop on Bubble and Drop Interfaces (Lyon, France, 2017),
- 9th Conference of the International Marangoni Association “Interfacial Fluid Dynamics and Processes” (Guilin, China, 2018).

Публикации

Основные результаты диссертационного исследования опубликованы в 10 печатных изданиях, 3 из которых являются журналами, включенными в наукометрическую базу данных WoS, 1 – в базу данных ВАК, 5 – тезисы докладов на конференциях, 1 – патент на изобретение.

Структура и объем диссертации

Диссертация состоит из введения, пяти глав и заключения. Полный объем диссертации составляет 104 страницы, содержащую 46 рисунков и 3 таблицы. Список литературы состоит из 107 источников.

КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы, сформулированы цель и задачи исследования, пути их решения, изложены научная новизна, практическая значимость работы, приведены основные результаты и положения, выносимые на защиту.

В первой главе дано феноменологическое описание термокапиллярной и концентрационно-капиллярной конвекций, отражено современное состояние в исследуемой области науки, проведен аналитический обзор существующих экспериментальных и теоретических работ по исследованию термокапиллярной

и концентрационно-капиллярной конвекций. Большинство существующих работ содержат результаты исследований термокапиллярной конвекции в тонких пленках жидкости, в то время как задача термокапиллярной конвекции в сидячей капле с неподвижной линией трехфазного контакта остается не исследованной. Концентрационно-капиллярная конвекция, вызванная локализованным тепловым потоком в тонких плёнках бинарных растворов, остается малоизученным явлением в целом.

Таким образом, задача изучения указанных видов конвекции Марангони и влияния локального теплового потока на форму межфазной границы жидкость-газ является актуальной как с научной, так и прикладной точек зрения.

Во второй главе дается описание экспериментальной установки и методик измерений. Схема экспериментальной установки приведена на рисунке 1(а). В качестве источника локализованного теплового потока использовали твердотельный лазер 1 (модель АТС-53-250), излучающий в зеленой части спектра (диаметр пучка $d=0.8$ мм, длина волны $\lambda=530$ нм), пучок которого с помощью зеркала 2 проецировали в горизонтально расположенную ячейку 3. Конструкция ячейки показана на рисунке 1 (б). В ячейку помещали каплю жидкости, предварительно окрашенной кристаллическим фиолетовым красителем с целью повышения поглощения лазерного излучения. Пучок лазера направляли соосно по нормали к плоскости подложки, на которой располагалась капля. В качестве тестового объекта 4 использовали металлическую решетку с расстоянием между прутьями 0.4 мм и толщиной прутьев 0.1 мм, которая располагалась на расстоянии от 5.5 до 4 мм под ячейкой с каплей. Кривизну поверхности капли измеряли посредством анализа полученного оптического изображения тестового объекта сквозь жидкость в ячейке, для чего использовался микроскоп 5 (Carl Zeiss Stemi 508), оборудованный CCD-камерой. Между ячейкой с жидкостью и объективом микроскопа располагался светофильтр 6 из цветного стекла ОС13 (набор образцов по ТУ 3-3, 729-77 из оптического цветного стекла по ГОСТ 9411-81) для отсечения проходящего лазерного излучения, которое приводило к засветке изображения и могло привести к неисправности матрицы CCD-камеры.

Ячейка представляла собой отверстие диаметром 6.0 мм в пластине полиметилметакрилата (ПММА) толщиной 4.0 мм. Снизу отверстие закрывали фрагментом силикатного стекла толщиной 1.0 мм, которое крепили к поверхности ПММА с помощью эпоксидного клея. Данный фрагмент образует дно ячейки, на котором располагается сидячая капля жидкости. При исследовании термокапиллярной конвекции в сидячей капле ячейку оставляли открытой. При изучении концентрационно-капиллярной конвекции в тонком слое, ячейку герметично закрывали сверху аналогичным фрагментом стекла, представляющим собой прозрачную крышку. Герметичная ячейка предотвращала испарение компонентов раствора, обеспечивала конденсацию паров в основной объем жидкости и предотвращала воздействие конвективных потоков окружающего воздуха на циркуляцию паров компонентов раствора над

жидкостью. Дозированное нанесение жидкости на дно ячейки осуществлялось с помощью микролитрового шприца Hamilton.

В качестве основного параметра, характеризующего форму свободной границы жидкости, было выбрано фокусное расстояние. Измерение фокусного расстояния проводили исходя из того факта, что сидячая капля жидкости на поверхности представляет собой плоско-выпуклую линзу. Фокусное расстояние изменяется по мере деформации преломляющей поверхности капли. Поскольку высота капли на порядок меньше её диаметра, расчет проводили по формуле тонкой линзы.

В качестве рабочих жидкостей для исследования термокапиллярной конвекции использовали малолетучие этиленгликоль и бензиловый спирт. Для изучения концентрационно-капиллярной конвекции использовали бинарный раствор этанола в этиленгликоле с различной массовой концентрацией.

Температуру на поверхности жидкости при наличии локального теплового потока измеряли с помощью тепловизионной камеры FLIR A655sc. В случае концентрационно-капиллярной конвекции в пленках бинарных смесей измерение температуры проводили через частично прозрачную в данном ИК диапазоне кремниевую пластинку в качестве крышки ячейки. Краевой угол смачивания сидячих капель на стеклянной подложке измеряли на гониометрической установке.

В третьей главе представлены результаты исследования влияния мощности локализованного теплового потока, вызванного поглощением лазерного излучения, на форму свободной поверхности сидячей капли жидкости с неподвижной границей трехфазного контакта при термокапиллярной конвекции. Приведены результаты исследования распределения температуры на поверхности капли жидкости при локализованном тепловом потоке, проведена оценка времени стабилизации градиента температуры на поверхности капли, получены зависимости фокусного расстояния от мощности теплового потока.

На рисунке 2 показаны радиальные распределения температуры в каплях этиленгликоля и бензинового спирта объемом 0.6 мкл при мощности лазерного

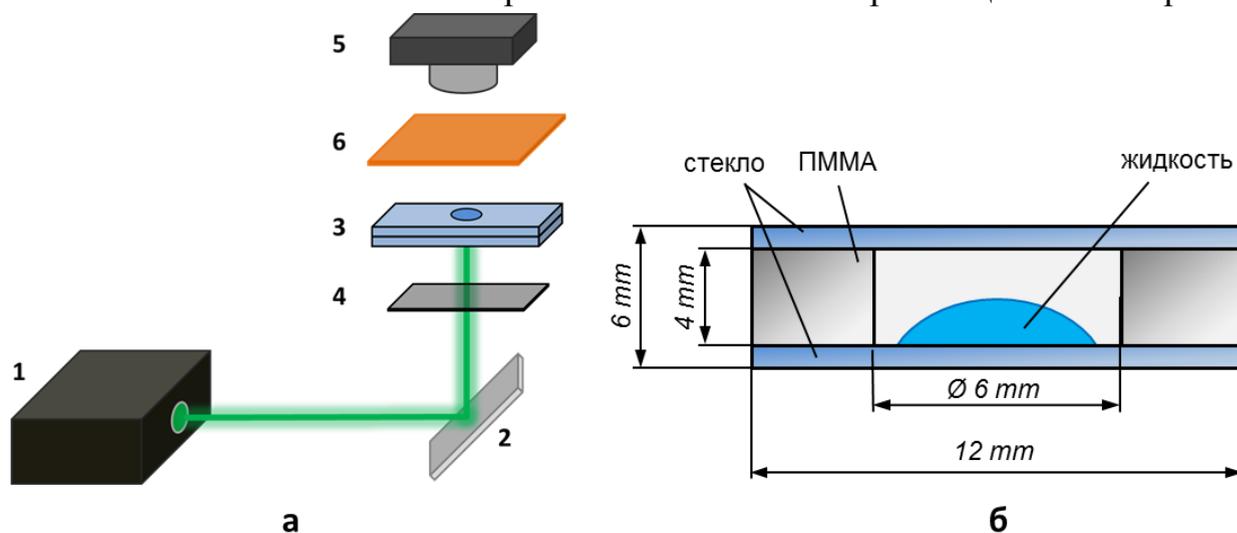


Рисунок 1 – Схема экспериментальной установки (а) и ячейки с каплей жидкости (б)

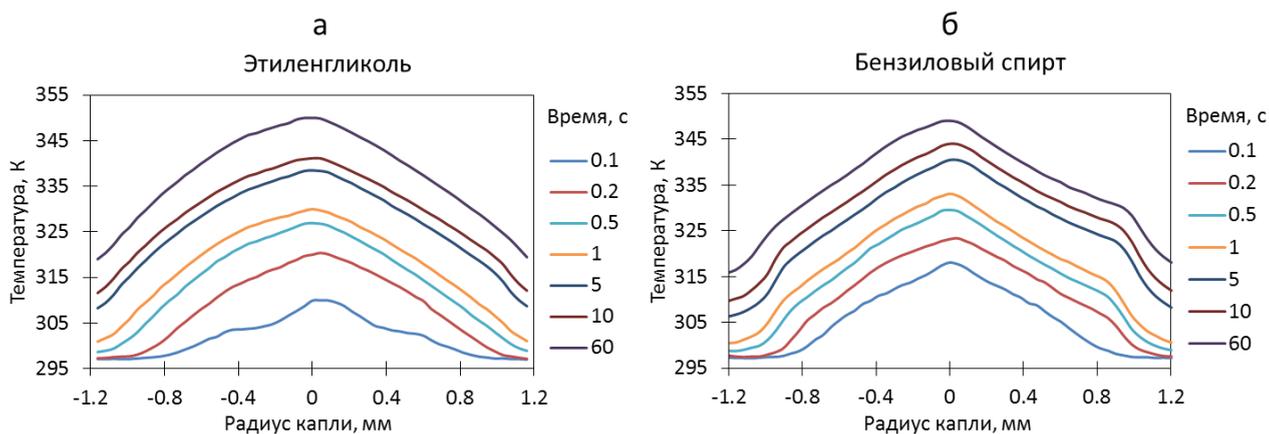


Рисунок 2 – Распределение температуры в капле: а) бензиловый спирт; б) этиленгликоль.

пучка 125 мВт в различные моменты времени. В центре капли температура максимальна и спадает к кромке. С течением времени облучения (нагрева) температура в каждой точке поверхности растёт. Наклон кривых при этом спустя время менее 1 с после начала облучения практически не изменяется. Таким образом, как показано на рисунке 3(а), вдоль поверхности капли между её вершиной и кромкой устанавливается стационарный градиент температуры, значение которого изменяется в пределах погрешности. Сравнение результатов оптических измерений (эволюция фокусного расстояния) и измерений температуры (эволюция, распределение) показало, что время аккомодации фокусного расстояния определяется временем установления градиента температуры. Рисунок 3(б) показывает зависимость времени перестройки фокусного расстояния от величины мощности подаваемого теплового потока. На рисунке 4 представлены экспериментально измеренные зависимости фокусного расстояния преломляющей поверхности капли от мощности теплового потока для бензинового спирта и этиленгликоля различных объемов. Графики характеризуют геометрическую форму преломляющей поверхности капли, которая при отсутствии локального теплового потока или малой его мощности является выпуклой и имеет положительное фокусное расстояние. По мере увеличения мощности, кривизна поверхности уменьшается (капля уплощается)

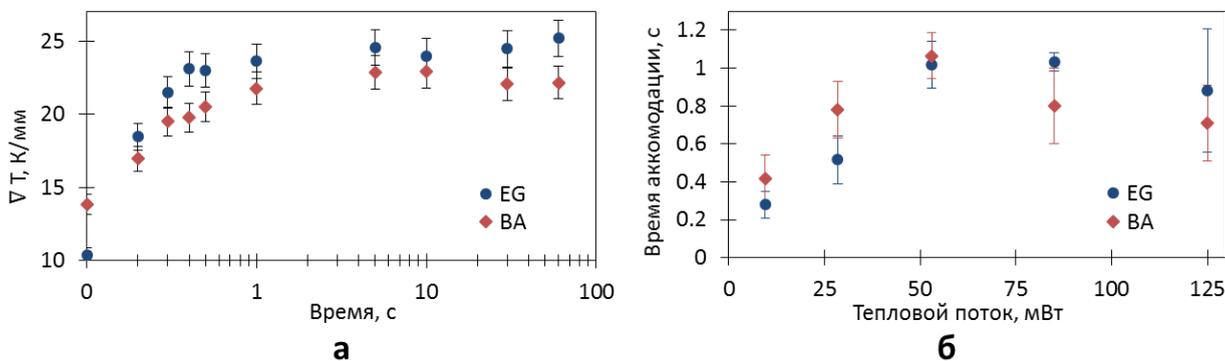


Рисунок 3 – Время стабилизации градиента температуры в капле при 125 мВт (а) и время стабилизации поверхности при различных мощностях теплового потока (б).

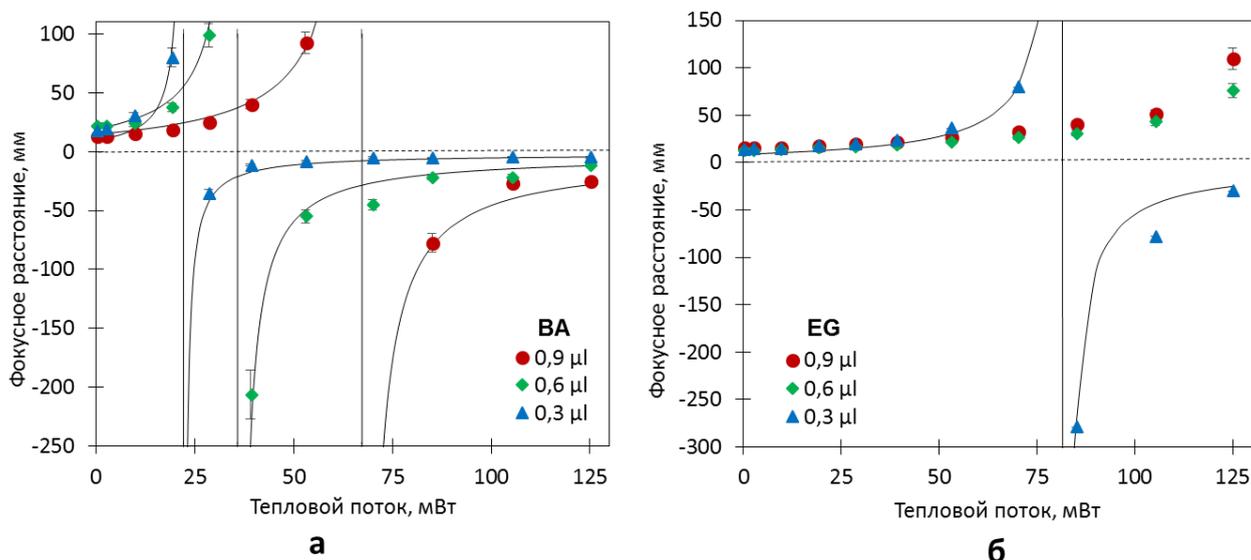


Рисунок 4 – Зависимость фокусного расстояния жидкой линзы на основе бензилового спирта (а) и этиленгликоля (б) от мощности теплового потока.

и фокусное расстояние растёт. При появлении термокапиллярного углубления на поверхности фокус становится отрицательным и стремится к нулю при дальнейшем увеличении мощности, что связано с ростом кривизны центрального участка термокапиллярного углубления в капле. Аппроксимирующие функции (чёрные линии), позволяют оценить пороговую мощность, при которой кривизна поверхности капли в центре и её фокусное расстояние меняют знак. В каплях большего объема смена знака кривизны свободной поверхности, и следовательно, фокусного расстояния, происходит при больших значениях мощности теплового потока, что обусловлено размытием теплового фронта за счет кондуктивного и конвективного переноса тепла из зоны воздействия пучка лазера в объем капли. Также видно, что в каплях этиленгликоля объемом 0.6 и 0.9 мкл фокусное расстояние принимает только положительные значения, что говорит об отсутствии термокапиллярного углубления.

На основе решения системы уравнений Навье-Стокса в приближении тонкого слоя ($h_0/D \ll 1$, где h_0 – начальная высота капли, D – диаметр основания) получено уравнение, описывающее стационарный профиль поверхности капли с неподвижной линией трехфазного контакта:

$$\frac{\partial \sigma}{\partial r} \left(\frac{3}{2h} + \frac{\partial^2 h}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial \sigma}{\partial r} \right) + \frac{\sigma}{r} \frac{\partial^2 h}{\partial r^2} - \frac{\sigma}{r^2} \frac{\partial h}{\partial r} = 0$$

где σ – поверхностное натяжение жидкости, $h(r)$ – высота капли, r – радиус. Граничные условия на кромке капли имели вид: $h(r) = 0$, $\frac{\partial h}{\partial r} = -\theta$, где θ – краевой угол смачивания, рисунок 5. Поверхностное натяжение изменяется по закону $\sigma(T) = \sigma_0 + \frac{\partial \sigma}{\partial T} \Delta T$, где σ_0 – поверхностное натяжение при нормальных условиях, ΔT – перепад температуры, $\frac{\partial \sigma}{\partial T}$ – температурный коэффициент поверхностного натяжения. Распределение температуры на поверхности

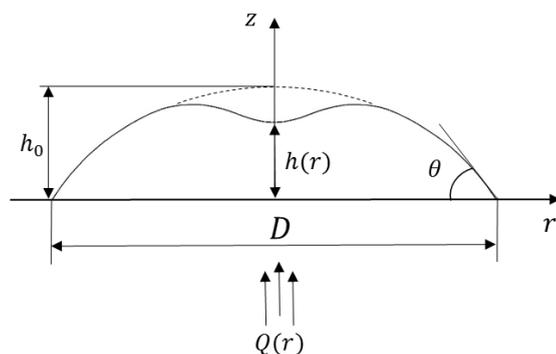


Рисунок 5 – Постановка задачи при моделировании термокапиллярной деформации поверхности капли.

задавали функцией аппроксимирующей экспериментальные зависимости (см. рисунок 2). Полученное уравнение было решено численно в пакете Maple методом Рунге-Кутты 4-5-го порядка. Результаты расчетов для капли бензилового спирта (0.6 мкл) при тепловом потоке различной мощности приведены на рисунке 6. Принимая форму капли как сегмент сферы, наблюдается хорошая корреляция между экспериментально измеренным и расчетным профилем поверхности капли в отсутствие теплового потока. При нагреве капли её поверхность принимает более плоскую форму – радиус кривизны и фокусное расстояние в центре увеличиваются. С ростом теплового потока поверхность капли принимает вогнутую форму, т.е. в капле формируется термокапиллярное углубление с отрицательным радиусом кривизны и фокусным расстоянием. Сравнение экспериментальных и расчетных значений фокусного расстояния для капли бензилового спирта различных объемов для разных мощностей теплового потока представлено на рисунке 7. Результаты численного эксперимента имеют тот же порядок величины, что и экспериментальные данные. Наибольшее расхождение значений радиуса кривизны наблюдается в областях пороговой мощности, что связано с большими значениями радиуса кривизны поверхности и, соответственно, большими погрешностями. В целом модель качественно и достаточно точно количественно отображает зависимость формы поверхности капли от мощности локализованного теплового потока.

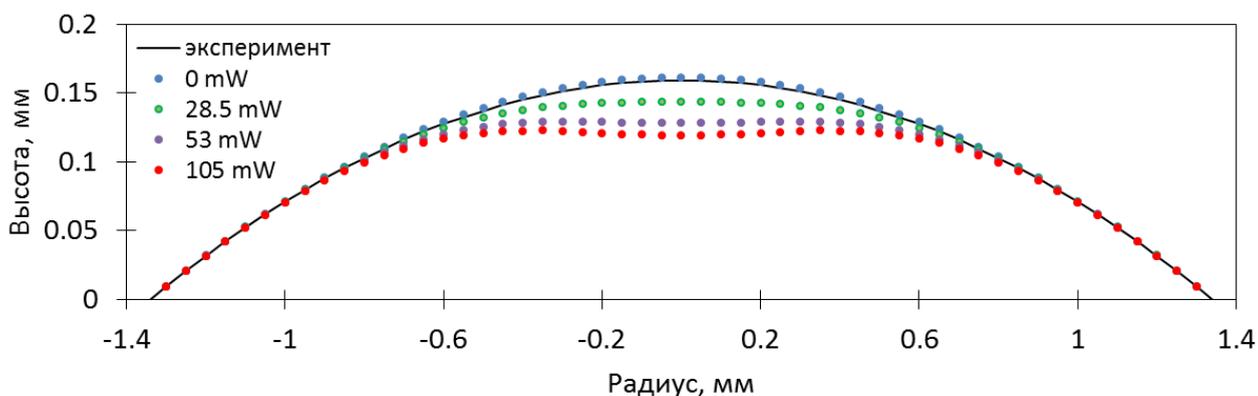


Рисунок 6 – Кривая поверхности капли, деформированная термокапиллярной конвекцией.

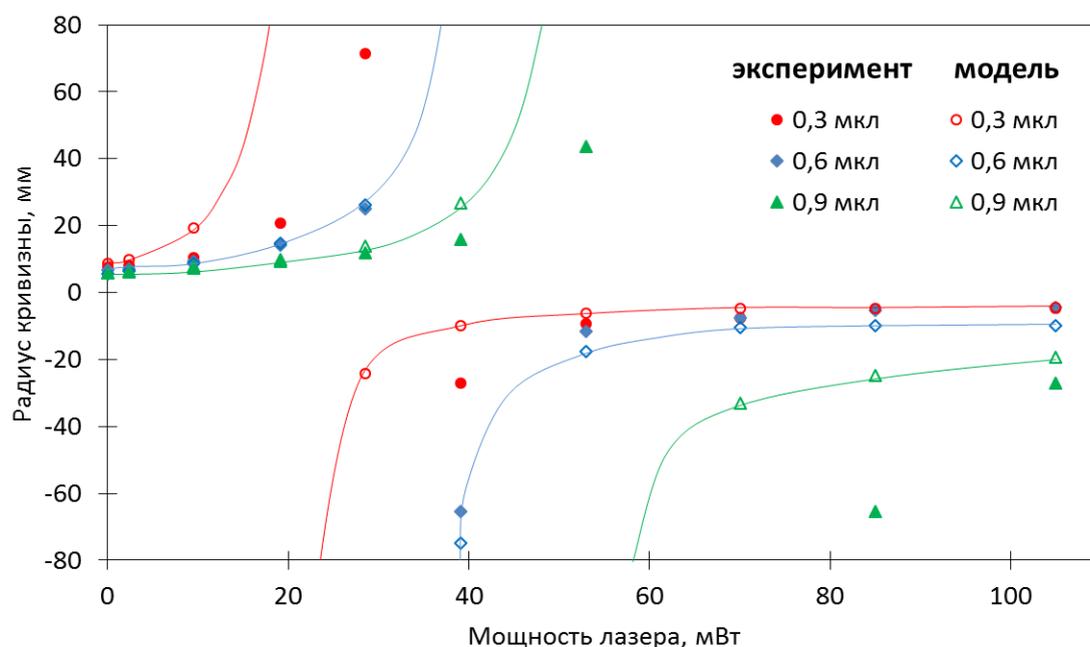


Рисунок 7 – Численная и экспериментальная зависимости радиуса кривизны от фокусного расстояния.

Впервые разработана математическая модель термокапиллярной конвекции в сидячей капле жидкости на твёрдой подложке при воздействии локального потока тепла. Постановка задачи представлена рисунке 8. Модель основана на системе уравнений Навье-Стокса, уравнения неразрывности, уравнения теплового баланса и уравнения Фурье. Поглощение лазерного излучения жидкостью, в качестве источника локального теплового потока, описывается законом Бугера-Ламберта-Бэра. Задача дополнена граничным условием, определяющим баланс сил на межфазной границе жидкость-воздух. Учитывая, что этиленгликоль и бензиловый спирт имеют относительно низкое давлением насыщенных паров, 7 и 15 Па соответственно, и высокую температуру кипения, 197 °С и 205 °С соответственно, испарением жидкости при нагреве пренебрегали. Численное решение задачи выполнено в пакете COMSOL Multiphysics методом конечных элементов в цилиндрической системе координат. Были получены распределения скоростей и температур в сидячих каплях жидкости при воздействии локального теплового потока. На рисунке 9

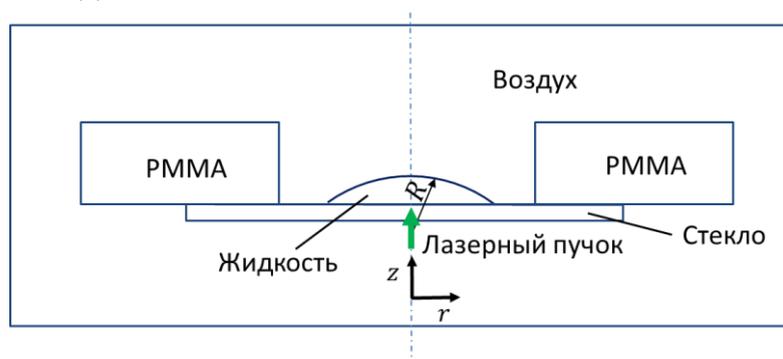


Рисунок 8 – Постановка задачи при моделировании в COMSOL Multiphysics.

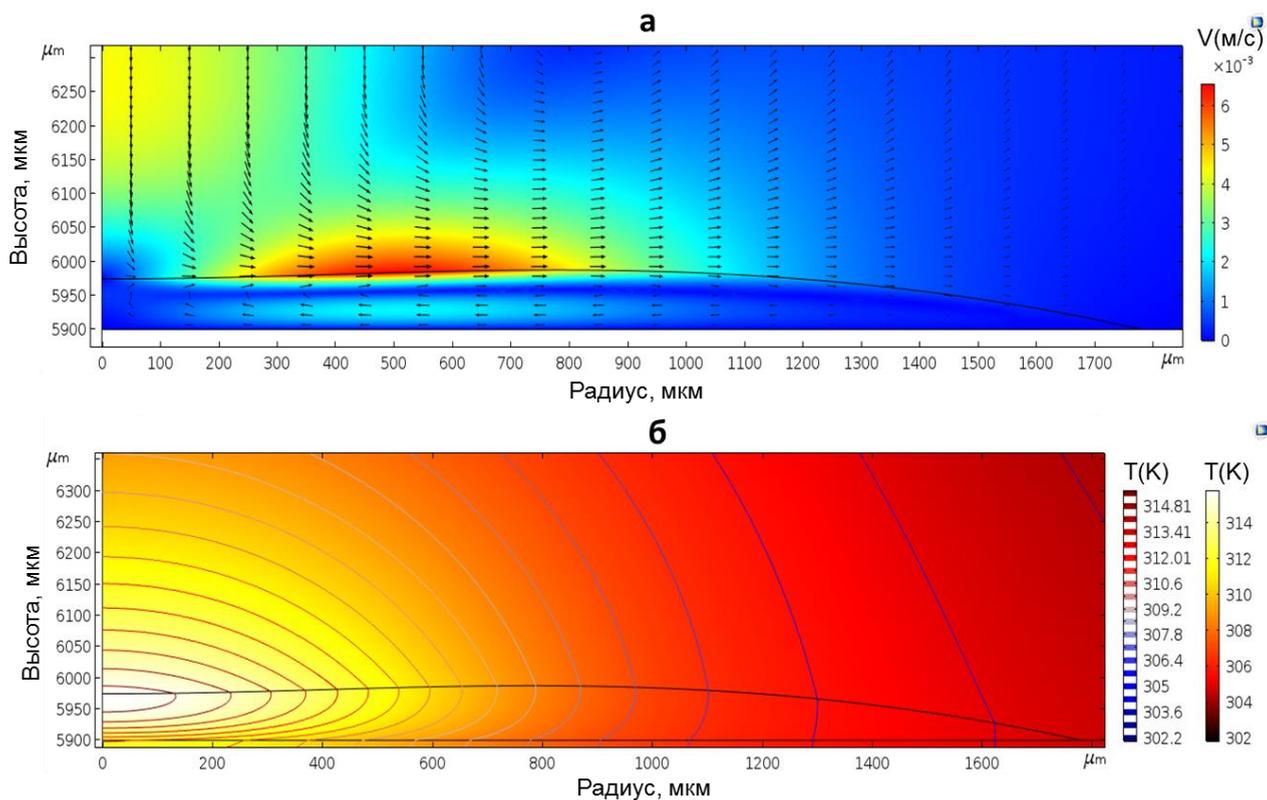


Рисунок 9 – Поле скоростей (а) и поле температур (б) в сидячей капле бензилового спирта при мощности теплового потока 34

представлены поле скоростей и поле температур для капли бензилового спирта объемом 0.6 мкл и мощностью теплового потока 34 мВт через 30 с после включения лазера. На рисунке 9(а) стрелками указано направление конвективного тока жидкости в капле и газа над каплей. Вблизи поверхности капли течение имеет центробежное направление, что соответствует градиенту поверхностного натяжения и приводит к прогибу поверхности в зоне действия пучка. Над каплей за счет вязких сил на границе жидкость-воздух формируются конвективные вихревые потоки воздуха. На рисунке 9(б) линиями обозначены изотермы, которые указывают на максимум температуры в центре под поверхностью капли при основном поглощении излучения придонными слоями жидкости, что говорит о смещении области температурного максимума восходящими конвективными потоками жидкости. Зависимости градиента температуры на поверхности капли от мощности теплового потока, измеренные экспериментально и полученные путем численных расчетов, представлены на рисунке 10. Видно, что для всего диапазона мощности теплового потока наблюдается хорошая корреляция между данными экспериментальных измерений и численными результатами. На рисунке 11 (а) представлена эволюция формы поверхности сидячей капли бензилового спирта при мощности теплового потока 34 мВт. Наиболее значительное изменение формы поверхности происходит в течение первой секунды облучения, что согласуется с данными экспериментальных измерений, представленными на рисунке 3(б). Рисунок 11(б)

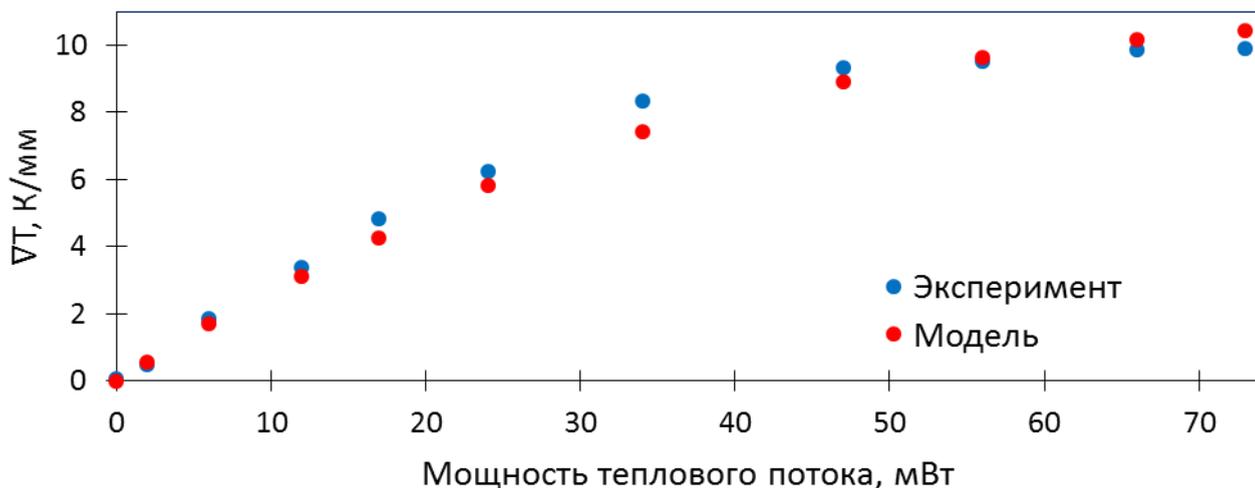


Рисунок 10 – Зависимость градиента температуры на поверхности капли от мощности теплового потока.

отображает установившийся профиль поверхности капли при различных мощностях теплового потока. Предложенная модель позволяет описывать основные этапы развития термокапиллярной конвекции в капле, наблюдаемые экспериментально. На рисунке 12 показаны зависимости фокусного расстояния преломляющей поверхности капли от мощности теплового потока. Результаты экспериментальных измерений и численного моделирования хорошо согласуются между собой. Исключением является зона пороговой мощности теплового потока, рисунок 12(а), характеризующаяся большой погрешностью измерений, где фокусное расстояние стремится к бесконечности.

В четвертой главе приведены результаты экспериментального исследования концентрационно-капиллярной конвекции в тонком слое бинарного раствора при действии локализованного источника тепла. В частности, исследованы тепловые и гидродинамические особенности течения жидкости, измерены характерные времена отклика диаметра основания и фокусного расстояния капли на изменение тепловой мощности.

На рисунке 13 представлены экспериментальные данные распределения температуры на поверхности слоя 50%-й бинарной смеси этиленгликоля и этанола объемом 1 мкл для различных мощностей теплового потока. Как и в случае термокапиллярной конвекции, максимальная температура достигается в

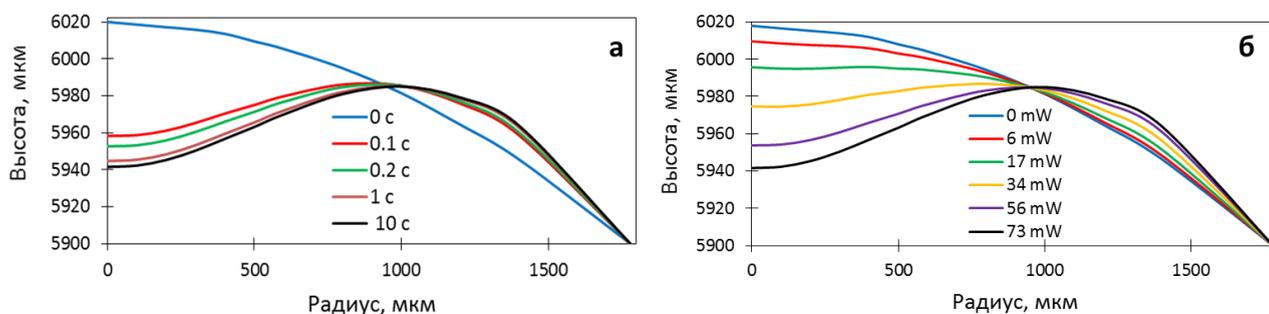


Рисунок 11 – Эволюция профиля поверхности капли при 34 мВт мощности (а) и профиль поверхности капли при различных мощностях (б).

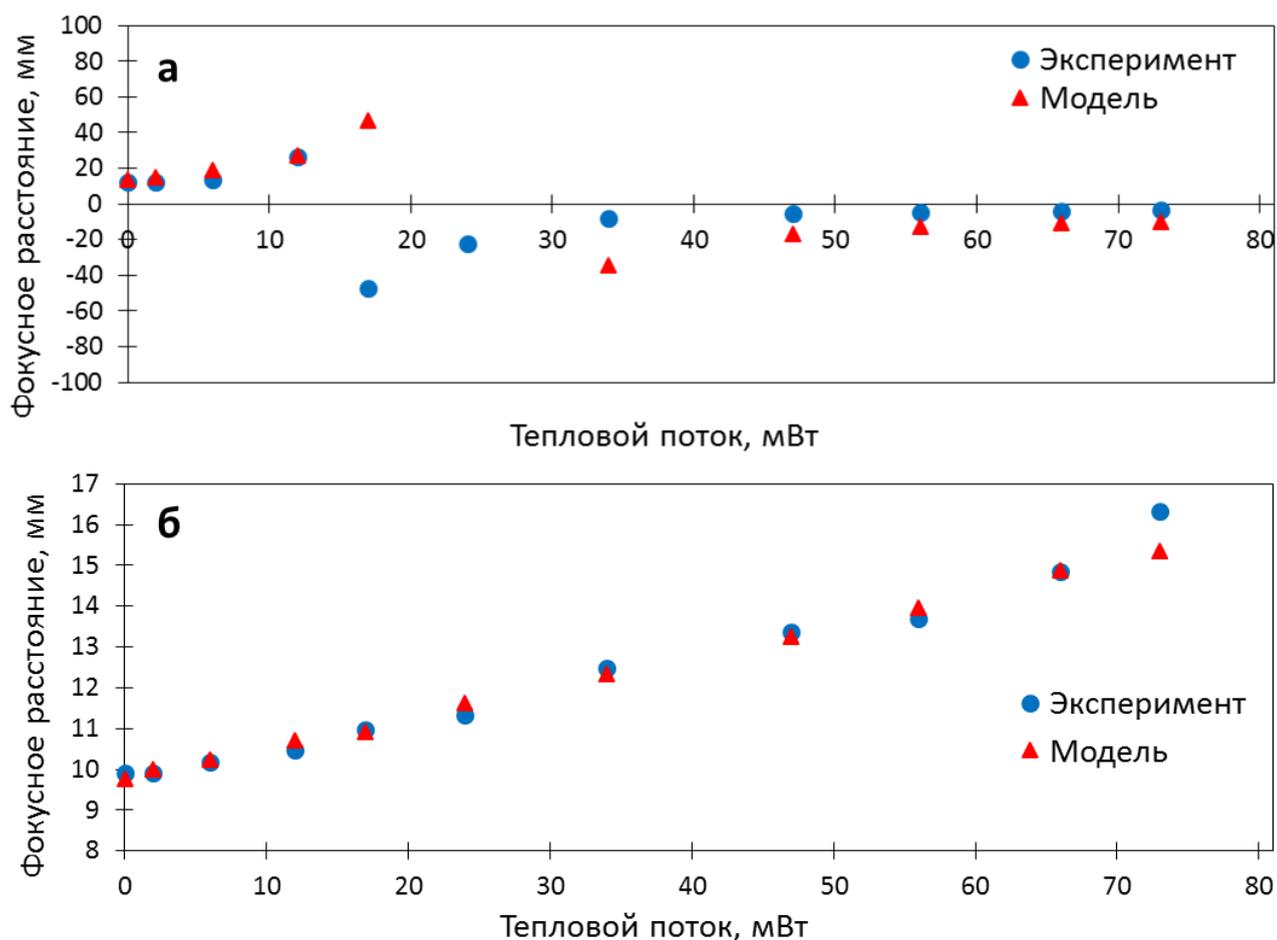


Рисунок 12 – Зависимость фокусного расстояния преломляющей поверхности капли бензилового спирта (а) и этиленгликоля (б) от мощности теплового потока.

области поглощения лазера, от которой тепло распространяется на периферию. Градиент температуры растет с мощностью теплового потока, что видно из наклона кривых температуры. Исследованы особенности поведения капли, сформированной тепловым потоком при циклическом повышении и понижении его мощности, рисунок 14. В первом цикле повышения/понижения мощности наблюдается заметное уменьшение диаметра капли по сравнению с первоначальным (т.е. гистерезис диаметра), что обусловлено процессом насыщения ячейки парами этанола. При последующих 10 циклах изменения мощности теплового потока обратимое изменение диаметра капли происходит с незначительным гистерезисом, который, очевидно, связан с инерционностью процесса конденсации паров этанола в раствор.

Проведена экспериментальная оценка зависимости формы поверхности капли от мощности теплового потока для растворов различной массовой концентрации этиленгликоля. Результаты представлены на рисунке 15, где форма поверхности выражена через фокусное расстояние преломляющей поверхности. Как видно, фокусное расстояние уменьшается с ростом мощности теплового потока, что связано с ростом градиента температуры, рисунок 13, и, соответственно, ростом градиента поверхностного натяжения, которые приводят к интенсификации конвективно-капиллярных потоков внутри капли и

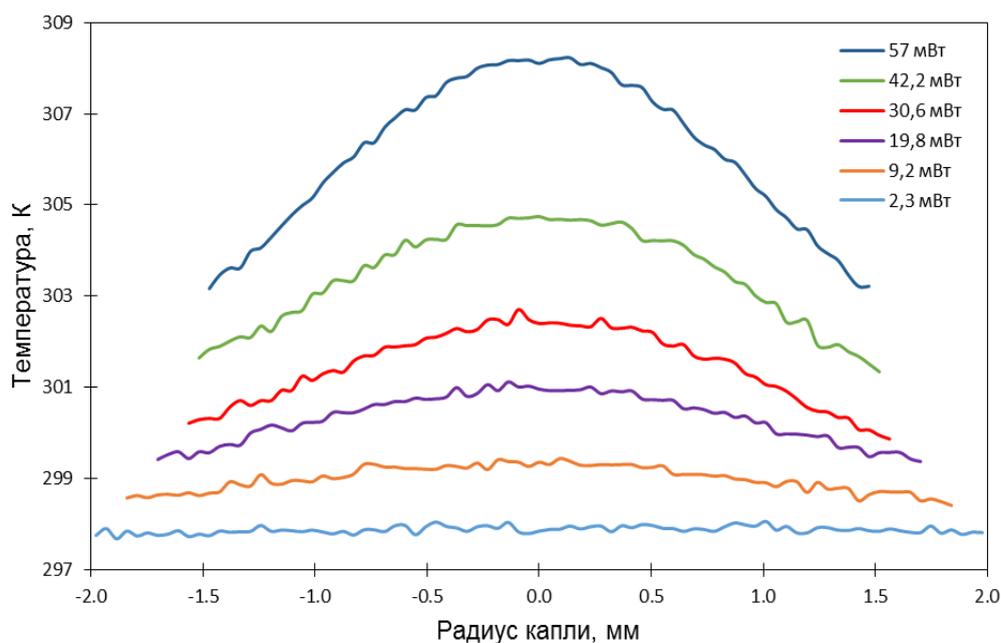


Рисунок 13 – Распределение температуры в капле бинарного раствора при различной мощности теплового потока.

уменьшению диаметра её основания, рисунок 14, при относительно небольшом изменении объема. Таким образом, площадь поверхности капли изменяется мало по отношению к изменению площади основания, что приводит к изменению кривизны поверхности капли. При уменьшении теплового потока наблюдается обратный процесс растекания капли и увеличения фокусного расстояния преломляющей поверхности поверхности. Наибольший интервал изменения фокусного расстояния наблюдается для раствора с наименьшей концентрацией этиленгликоля, что связано с большей плотностью потока этанола при испарении

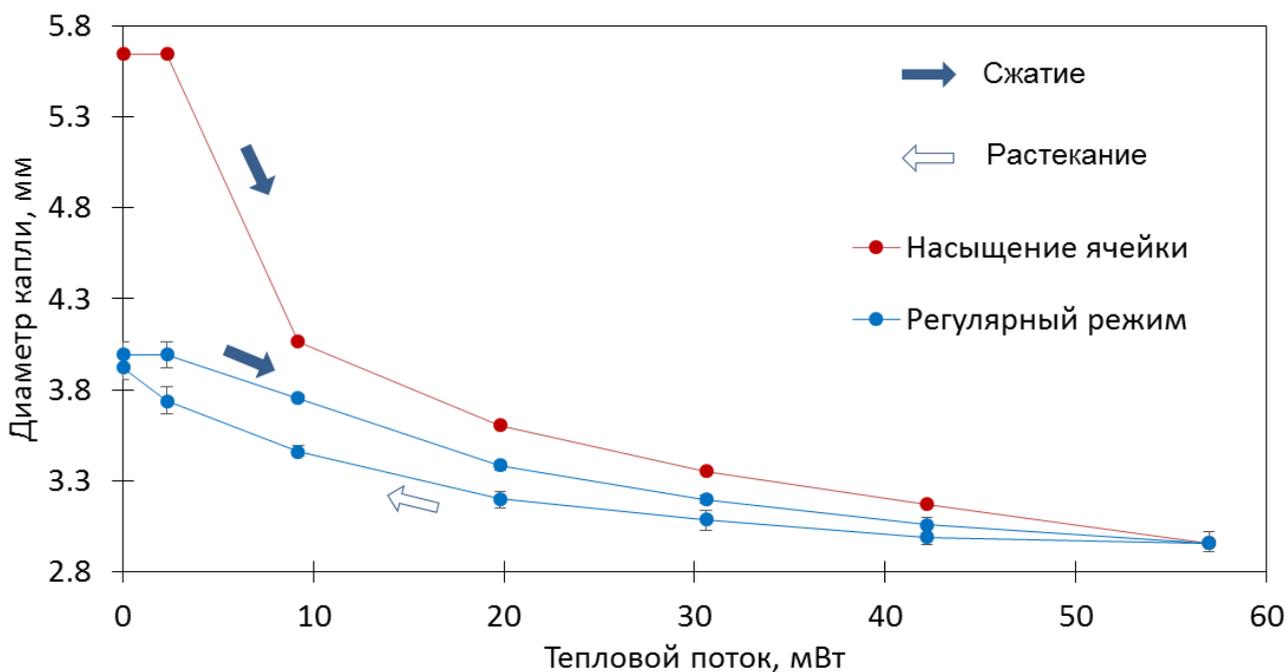


Рисунок 14 – Изменение диаметра капли при циклическом изменении мощности.

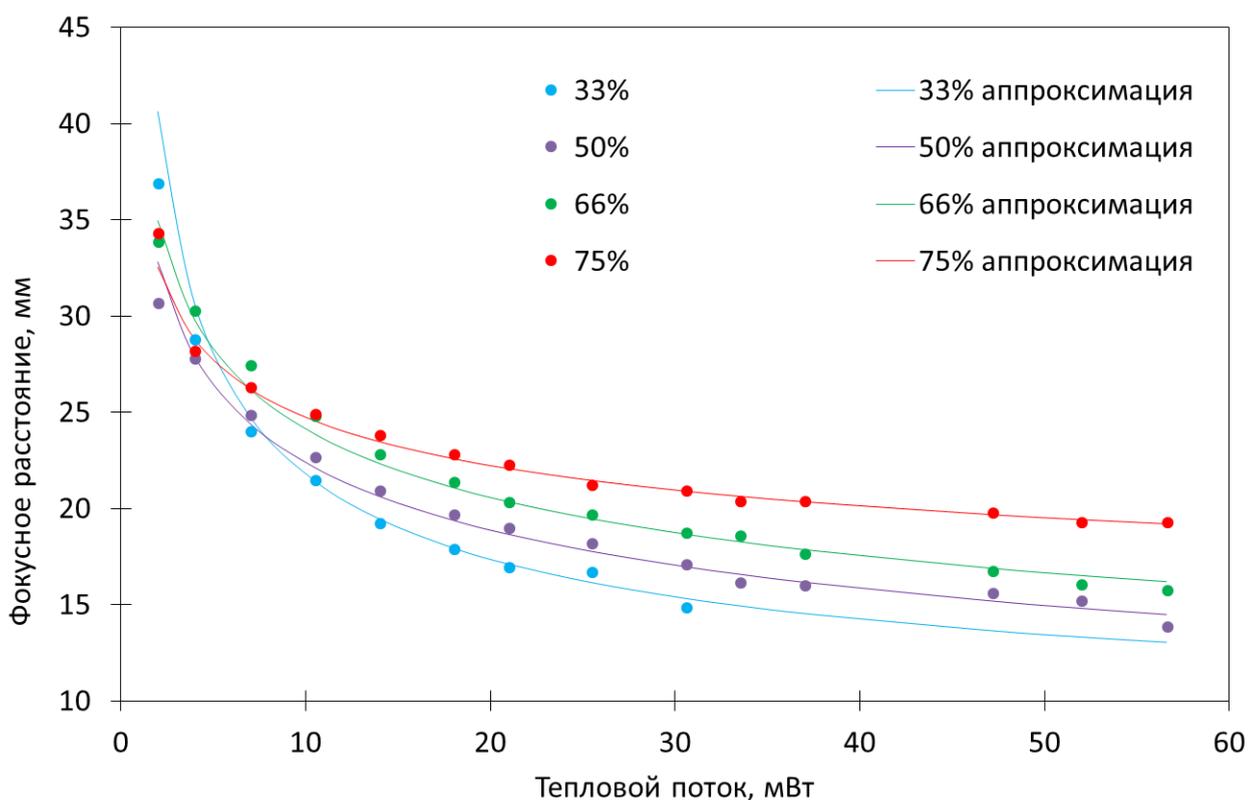


Рисунок 15 – Зависимость фокусного расстояния от теплового потока для различных концентраций этиленгликоля.

и, следовательно, наибольшим градиентом концентрации при использовании данного раствора. Линии на графике отображают аппроксимированные функции фокусного расстояния F от мощности теплового потока P , которые можно представить в виде $F(P) = a \cdot P^n + b$, где a, b, n – эмпирические константы.

На рисунке 16 представлены результаты измерения времени перестройки фокусного расстояния (изменения формы поверхности капли) в ответ на изменение мощности теплового потока для капли 50%-го раствора объемом 1 мкл. В области малых значений мощности растекание (релаксация капли в тонкий слой) происходит медленнее, что связано, как уже было замечено, с инерционностью процесса конденсации паров этанола, а также шероховатостью и плохой смачиваемостью подложки.

В пятой главе представлен краткий обзор жидкостных оптических элементов, приведена классификация элементов по принципу их действия, рассмотрена возможность использования термокапиллярной конвекции в сидячей капле и концентрационно-капиллярной конвекции в тонком слое бинарного раствора в качестве механизмов контроля кривизны преломляющей поверхности жидкости и использования подобных жидкостных систем в качестве варифокальных линз.

Идея использования капли жидкости в качестве линзы была предложена ещё в 1695 г. В разное время предлагались идеи использования жидкости в качестве параболических зеркал с регулируемым фокусом, которая сегодня реализована в нескольких телескопах. В последние 20 лет повсеместная

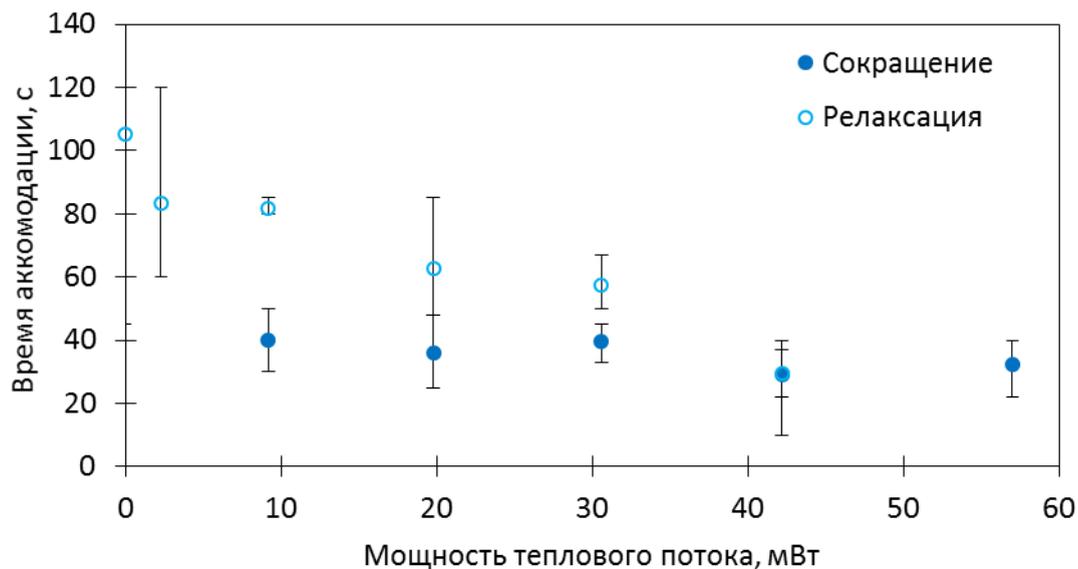


Рисунок 16 – Время перестройки фокусного расстояния поверхности при сокращении и растекании (релаксации) капли.

миниатюризация оптических систем и элементов и необходимость решения ряда проблем, возникающих при этом, стимулировала весьма активные разработки жидких линз. На сегодняшний день прототипов жидких линз настолько много, что возникает потребность в их классификации. Предложен вариант классификации по принципу работы, рисунок 17, разделяющий разработки на две группы: изменение формы межфазной границы и изменение показателя преломления. Первая группа разделена на 2 подгруппы по виду сил, посредством которых изменяется форма преломляющей поверхности: поверхностные и объемные силы. К поверхностным силам относится поверхностное натяжение, в то время как к объемным силам отнесены диэлектрофорез, гидростатическое давление и акустические осцилляции. К группе линз на основе изменения показателя преломления относятся термолинзы и линзы на основе контроля ламинарных потоков, или т.н. L-GRIN – жидкие линзы с градиентным показателем преломления.

Термокапиллярная конвекция в сидячей капле жидкости и вызванная ею деформация поверхности капли может быть использована в качестве способа изменения фокусного расстояния преломляющей поверхности капли в широком интервале значений. На рисунке 18 представлена схема работы капли в режимах плоско-выпуклой собирающей и плоско-вогнутой рассеивающей тороидальной линзы. Фокусное расстояние линзы можно динамически контролировать посредством изменения мощности локализованного теплового потока. Сидячая капля жидкости представляет собой плоско-выпуклую собирающую линзу с коротким фокусным расстоянием F при подводе локализованного теплового потока (зелёная стрелка) преломляющая поверхность капли начинает уплощаться. По мере увеличения теплового потока P увеличивается F , пока поверхность не примет плоскую форму, а F устремится к бесконечности.



Рисунок 17 – Классификация существующих жидких линз.

Дальнейший рост теплового потока ведет к появлению термокапиллярного прогиба в капле и позволяет говорить о ней, как о плоско-вогнутой рассеивающей тороидальной линзе с отрицательным значением F , которое стремится к нулю по мере дальнейшего роста мощности теплового потока. При уменьшении теплового потока наблюдается обратный процесс. Зависимость фокусного расстояния от мощности теплового потока представлена на рисунке

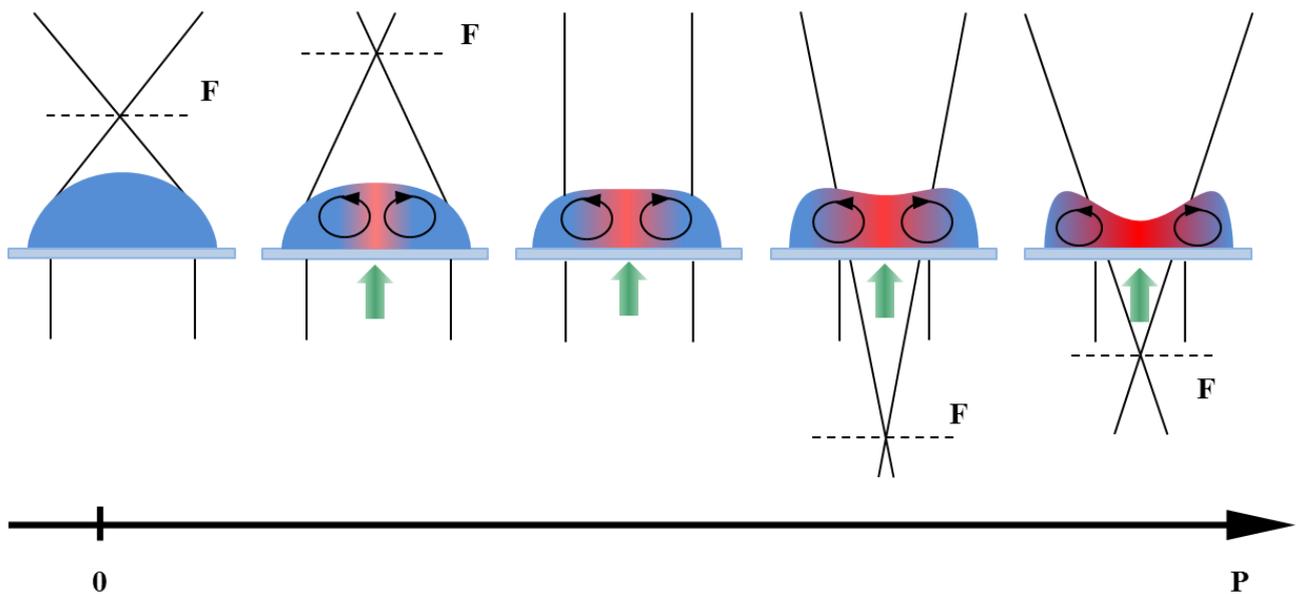


Рисунок 18 – Схема работа жидкостной линзы на основе термокапиллярной конвекции.

4. Изображения тестового объекта, полученные с помощью линзы представлены на рисунке 19. Измеренное численно и экспериментально время аккомодации линзы не превышает 1 с.

Исследованы оптические и динамические характеристики линз, контролируемые концентрационно-капиллярным эффектом, вызванным тепловым воздействием пучка лазера. Принцип работы такой линзы заключается в следующем. После нанесения раствора на подложку и его растекания, поверхность жидкости принимает плоскую форму, а фокусное расстояние преломляющей стремится к бесконечности. При воздействии теплового потока раствор собирается в каплю, ее поверхность приобретает выпуклую форму, а фокусное расстояние уменьшается, рисунок 15. Данная линза работает только в режиме плоско-выпуклой собирающей линзы. Время аккомодации линзы лежит в пределах 30-120 с как показано на рисунке 16. Примеры полученных изображений тестового объекта представлены на рисунке 20. Из-за особенностей экспериментальной установки, изображения являются мнимыми.

Линза на основе концентрационно-капиллярного эффекта обладает особенностью, которая качественно выделяет ее на фоне других разработок, а именно, возможностью перемещения по подложке вслед за источником теплового потока (пучком лазера). Такая возможность обеспечивается созданием локального градиента поверхностного натяжения в любой точке поверхности капли пучком лазера, что приводит к появлению конвективных потоков, переносящих жидкость в зону облучения, и выравниванию краёв капли для достижения осесимметричности и соосности с пучком. Кадры перемещения линзы 50%-го раствора этиленгликоля при мощности теплового потока 18 мВт

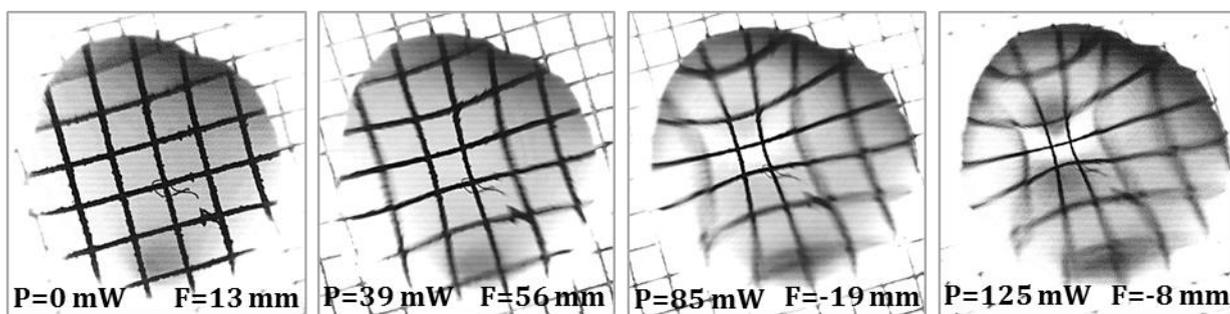


Рисунок 19 – Изображения тестового объекта, полученные с помощью линзы на основе термокапиллярного эффекта.

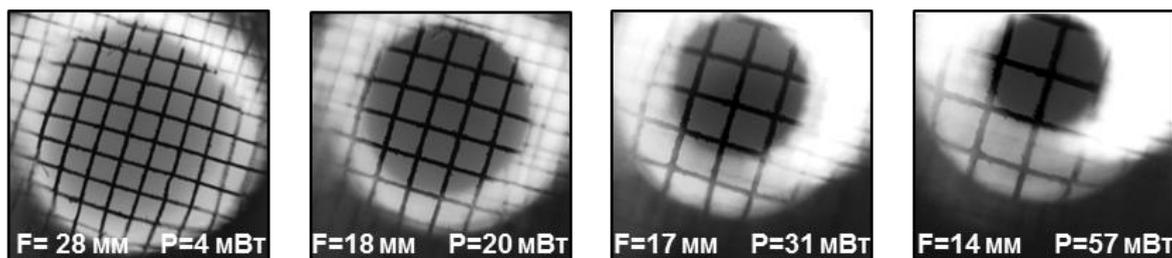


Рисунок 20 – Изображения, полученные с помощью концентрационно-капиллярной линзы.

представлены на рисунке 21. Важной характеристикой линзы является время отклика, т.е. время перемещения в новое, относительно её центра, положение управляющего пучка лазера. На рисунке 22 приведены значения времени отклика капли 50% раствора на смещение пучка на расстояние равное стационарному радиусу и двум радиусам для разных значений мощности теплового потока.

Другим важным условием функционирования жидкой линзы является её устойчивость при изменении угла поворота к горизонту. На рисунке 23(a) представлена диаграмма устойчивости капель объемом 1 мкл от мощности теплового потока и угла поворота. Определены две области работы капли в качестве «жидкой линзы», где капля устойчива на подложке, а изображения, полученные с помощью неё, имеют минимальные искажения. В диапазоне значений углов наклона от примерно 10° до 170° и при малых значениях мощности теплового потока капля не формировалась, слой раствора стекал по подложке. Область неустойчивой работы линзы наблюдается при мощности более 10 мВт и углах поворота более $10-20^\circ$. Данный вид неустойчивости представляет собой классический эффект «слёзы крепкого вина» – капля формируется на подложке при действии концентрационно-капиллярных сил, а затем, достигнув критического размера, скатывается по подложке под действием сил гравитации, после чего процесс повторяется.

Учитывая принцип работы линзы на основе концентрационно-капиллярного эффекта, необходимый процесс испарения одной из компонент раствора и его конденсации обратно в объем капли, возникает вопрос о долговечности работы подобной линзы. Проведенные исследования показывают функциональность линзы на протяжении 10 циклов через 72 часа после нанесения раствора и нескольких десятков циклов перестройки фокусного

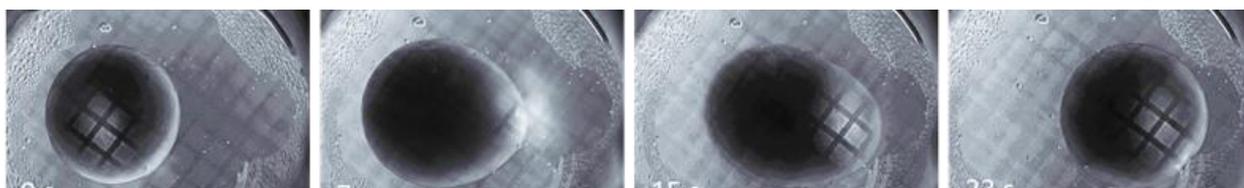


Рисунок 21 – Форма линзы при перемещении.

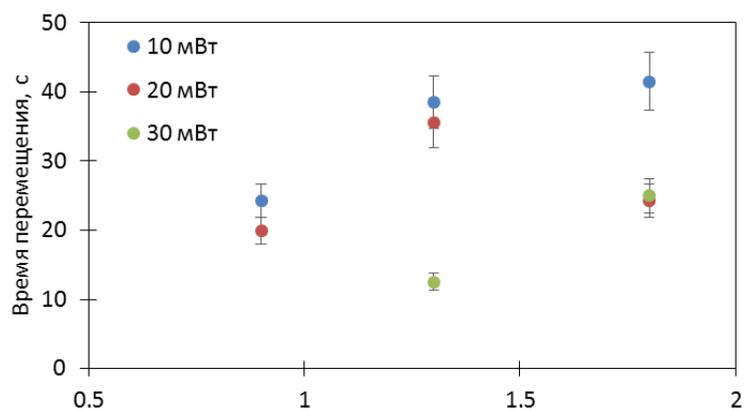


Рисунок 22 – Время перемещения линзы.

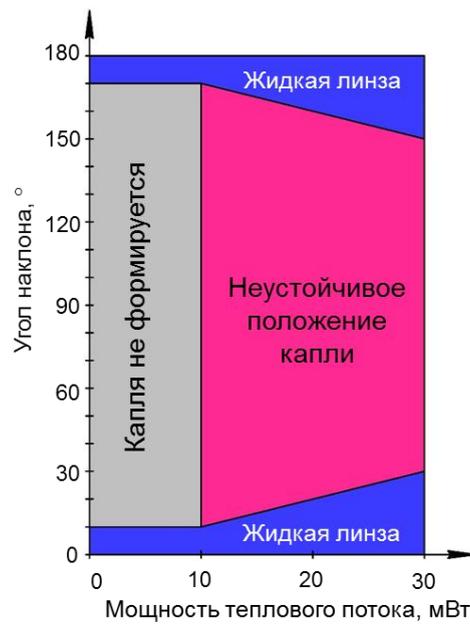


Рисунок 23 – Диаграмма устойчивости линзы на основе концентрационно-капиллярной конвекции.

расстояния линзы при обратимом изменении мощности теплового потока между значениями 4 и 57 мВт.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

1. Экспериментально исследована термокапиллярная конвекция, возбуждаемая локальным тепловым потоком в сидячей капле жидкости с неподвижной линией контакта. Показано, что при изменении мощности локализованного теплового потока форма свободной поверхности капли изменяется с выпуклой на вогнутую. Установлено, что время изменения формы капли при изменении мощности потока тепла определяется временем установления градиента температуры вдоль её свободной поверхности.
2. Разработана математическая модель термокапиллярной конвекции, возбуждаемой локальным тепловым потоком в сидячей капле жидкости с неподвижной линией контакта. Модель учитывает баланс сил на свободной поверхности капли и поглощение лазерного излучения жидкостью. Численно исследовано влияние мощности теплового потока на форму межфазной поверхности капли, получены распределения температуры и скорости в капле и на поверхности. Достигнута качественная и количественная согласованность результатов эксперимента и расчётов. Получено уравнение, описывающее стационарную форму поверхности капли при условии известного распределения температуры на поверхности, что позволяет рассчитать кривизну поверхности и фокусное расстояние при заданном поле температур на поверхности.
3. Показана возможность применения термокапиллярной конвекции, вызванной локализованным тепловым потоком в сидячей капле жидкости, для разработки жидкой варифокальной линзы. Фокусное расстояние линзы изменяется в широком диапазоне значений в режимах собирающей (плоско-выпуклой) и рассеивающей (плоско-вогнутой) тороидальной линзы путём управления мощностью теплового потока. Измерено характерное время перестройки фокусного расстояния при изменении мощности теплового потока. Для капель этиленгликоля и бензилового спирта объемом 0.3-0.9 мкл время перестройки лежит в диапазоне от 0.1 до 1 с при изменении мощности от 0 до 125 мВт.
4. Экспериментально исследовано влияние мощности локализованного теплового потока на форму межфазной границы при концентрационно-капиллярной конвекции в тонких слоях двухкомпонентных растворов с точки зрения создания жидких оптических линз. Изучено влияние мощности теплового потока на время формирования капли концентрационно-капиллярным механизмом и ее релаксации. Показано, что фокусное расстояние изменяется с мощностью потока тепла, а диапазон его изменения определяется начальной концентрацией раствора. При уменьшении начальной концентрации этиленгликоля в растворе диапазон перестройки фокусного расстояния увеличивается. Исследованы границы устойчивости сформированной капли в зависимости от угла наклона к горизонту при различных мощностях теплового потока.

СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

В журналах, входящих в наукометрическую базу данных WoS:

1. Malyuk A.Yu. Varifocal liquid lens actuated by laser-induced thermal Marangoni forces / A.Yu. Malyuk, N.A. Ivanova // *Applied Physics Letters*. – 2018. – Vol.112. – No.103701.
2. Malyuk A.Yu. Optofluidic lens actuated by laser-induced solutocapillary forces / A.Yu. Malyuk, N.A. Ivanova // *Optics Communications*. – 2017. – Vol.392. – P. 123-127.
3. Tatosova K.A. Droplet formation caused by laser-induced surface-tension-driven flows in binary liquid mixtures / K.A. Tatosova, A.Yu. Malyuk, N.A. Ivanova // *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*. – 2017. – Vol.521. – P. 22-29.

В рецензируемых научных изданиях, рекомендованных ВАК РФ:

1. Иванова Н.А. Моделирование термокапиллярной конвекции в сидячей капле жидкости, индуцированной лазерным пучком / Н.А. Иванова, А.Ю. Малюк // *Вестник Тюменского государственного университета. Физико-математическое моделирование. Нефть, газ, энергетика*. – 2019. – Т.5. – №2. – С. 160-174.

Патент на изобретение:

1. Варифокальная жидкая линза // патент РФ №2652522. 2018. Бюл. №12 / Иванова Н.А., Малюк А.Ю.

Материалы конференций:

1. Semenov S. Thermocapillary deformation of a pinned sessile droplet caused by a laser beam / S. Semenov, A. Malyuk, N. Ivanova // *Book of Abstracts. IMA9 – The 9th Conference of the International Marangoni Association “Interfacial Fluid Dynamics and Processes”*. – 2018. – P.52
2. Malyuk A.Yu. Droplet-based microlenses actuated by laser-induced solutocapillary forces / A.Yu. Malyuk, N.A. Ivanova // *Book of Abstracts. EOS Optical Technologies - Conferences at the World of Photonics Congress (WPC 2017)*. – 2017. – P. 27.
3. Ivanova N.A. Droplet-based lenses actuated by laser-induced solutocapillary forces / N.A. Ivanova, A.Yu. Malyuk // *Book of Abstracts. 7th International Workshop on Bubble and Drop Interfaces*. – 2017. P.52.
4. Ivanova N.A. Adaptive liquid microlenses activated by light: toward an artificial eye / N.A. Ivanova, A.Yu. Malyuk // *Book of Abstracts. IOP Conference on optics and photonics “PHOTON16”*. – 2016. – P.94.
5. Malyuk A.Yu. Adaptive liquid microlenses actuated by laser-induced solutocapillary forces / A.Yu Malyuk, N.A.Ivanova // *Book of Abstracts. 3rd International School and Conference on Optoelectronics, Photonics, Engineering and Nanostructures “Saint Petersburg OPEN 2016”*. – 2016. – P.395-396.

Подписано в печать 26.09.2019. Тираж 120 экз.
Объем 1,0 уч.-изд. л. Формат 60×84/16. Заказ 642.

Издательство Тюменского государственного университета
625003, г. Тюмень, ул. Семакова, 10.
Тел./факс (3452) 59-74-81, 59-74-68
E-mail: izdatelstvo@utmn.ru