

На правах рукописи

ФЕДОРЕЦ Александр Анатольевич

**ЭФФЕКТЫ ТЕПЛОМАССОПЕРЕНОСА
ПРИ ЛОКАЛЬНОМ НАГРЕВЕ
МЕЖФАЗНОЙ ПОВЕРХНОСТИ ЖИДКОСТЬ-ГАЗ**

01.04.14 – Теплофизика и теоретическая теплотехника

**АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
доктора технических наук**

Тюмень – 2011

Работа выполнена в государственном образовательном учреждении высшего профессионального образования «Тюменский государственный университет».

Научный консультант доктор физико-математических наук, профессор
КИСЛИЦЫН Анатолий Александрович

Официальные оппоненты: доктор физико-математических наук, профессор
БОРЗЫХ Владимир Эрнестович

доктор технических наук, профессор
ВАКУЛИН Александр Анатольевич

доктор физико-математических наук, профессор
ПУТИН Геннадий Федорович

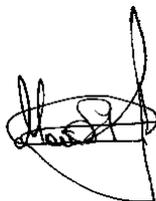
Ведущая организация Институт теплофизики им. С. С. Кутателадзе
Сибирского отделения РАН, г. Новосибирск

Защита состоится «___» _____ 2011 г. в ___ час. ___ мин. на заседании диссертационного совета Д 212.274.10 в Тюменском государственном университете по адресу: 625003, г. Тюмень, ул. Перекопская 15а, ауд. _____.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Тюменского государственного университета.

Автореферат разослан «___» _____ 2011 г.

*Ученый секретарь
диссертационного совета, кандидат
физико-математических наук*



А. С. Мамеев

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. Закономерности процессов тепломассопереноса в системах с межфазной поверхностью жидкость-газ представляют интерес для широкого круга фундаментальных и прикладных задач из разных областей науки и техники. Как правило, в этих задачах имеют место эффекты Марангони, в частности, термокапиллярные течения, являющиеся одним из основных объектов диссертационного исследования. В наземных условиях роль термокапиллярных течений в процессах тепломассопереноса может быть второстепенной – в случае макромасштабных систем, или доминирующей – если речь идет о каплях, пузырьках, жидких пленках, мостиках, менисках смачивания.

Термокапиллярный эффект оказывает существенное влияние на производственные процессы лазерной резки и легирования металлов, нанесения защитных покрытий, выращивания кристаллов, получения сверхчистых материалов. Наблюдающаяся активизация исследований эффектов Марангони, связана, прежде всего, с исследованиями и разработками в области микрофлюидики – междисциплинарного научно-технического направления, имеющего ключевое значение для развития таких высокотехнологичных устройств, как топливные элементы, тепловые трубки, биологические сенсоры, лаборатории на чипе и др. К объектам микрофлюидики также относится «Капельный кластер» – новая диссипативная структура, впервые описанная автором данной работы¹.

Появление технологий, позволяющих создавать сложные автоматизированные измерительные комплексы, привело к тому, что метрологические характеристики некоторых типов приборов, приближаются к своему теоретическому пределу. С другой стороны, прогресс практически не затрагивает отдельные сферы производства, поскольку на пути внедрения даже самых современных приборов, основанных на классических методах анализа жидкостей, непреодолимыми препятствиями становятся высокая стоимость оборудования и расходных материалов, жесткие требования к уровню квалификации персонала, узкая специализация приборов. Поэтому, не утрачивает актуальности задача расширения круга эффектов, используемых в качестве физической основы принципиально новых методов измерения.

Цель работы – разработка физических принципов, создание технологий и приборов на основе эффектов и явлений тепломассопереноса, протекающих при локальном нагреве межфазной поверхности жидкость-газ.

Задачами исследования являлись:

1. Развитие экспериментальных методов исследования процессов тепломассопереноса в макромасштабных жидких объектах;

¹ Федорец А.А. Капельный кластер // Письма в ЖЭТФ. – 2004. – № 8. – С. 457–459.

2. Разработка и экспериментальное обоснование метода анализа жидкостей, основанного на термокапиллярном эффекте;
3. Создание прибора, реализующего новый метод;
4. Разработка экспресс-методик производственного контроля показателей качества сырьевых и технологических жидкостей;
5. Комплексное исследование и создание физико-математической модели открытого автором явления – диссипативной структуры «Капельный кластер»;
6. Поиск практических приложений нового явления.

Научная новизна заключается в следующем:

1. Предложена и экспериментально обоснована концепция фотеконскопии² – метода исследования жидкостей, основанного на эффекте динамической деформации межфазной поверхности жидкость-газ термокапиллярными течениями, в котором источником информации о составе, теплофизических, реологических и других свойствах жидкости является фотеконограмма – эволюционная зависимость термокапиллярного отклика³.

2. Разработан комплекс методик исследования термокапиллярного эффекта, индуцируемого локализованным тепловым источником в тонком горизонтальном слое жидкости, позволяющих получать эволюционные зависимости параметров термокапиллярного углубления и отклика на всех стадиях развития и релаксации течений.

3. Впервые осуществлена приборная реализация метода фотеконскопии: создан многоцелевой анализатор жидкостей, пакет компьютерных программ, управляющих процессами измерения, обработки и хранения экспериментальных данных, а также ряд специализированных методик мультипараметрического производственного контроля показателей качества сырьевых и технологических жидкостей.

4. Описано новое явление – диссипативная структура «Капельный кластер» – стабильная гексагональная структура из микрокапель конденсата (диаметром 15...150 мкм), располагающихся над локально нагретой поверхностью испаряющейся жидкости на расстоянии сопоставимом с диаметром капель. Создана экспериментальная установка и разработаны методики исследования капельных кластеров.

5. Изучены процессы тепломассопереноса и физические механизмы зарождения и устойчивого существования капельного кластера. Объяснены сопутствующие эффекты образования капельных тандемов, «спонтанной» коалес-

² Концепция метода сформировалась в процессе обобщения опыта исследований эффекта **ФО**тоиндуцированной **ТЕ**рмокапиллярной **КОН**векции.

³ Термокапиллярный (ТК) отклик – изображение, получаемое при проецировании на экран лазерного пучка, отраженного от жидкой поверхности, локально деформированной термокапиллярными течениями.

ценции капель кластера, охлаждения жидкой поверхности под капельным кластером. Предложена физико-математическая модель явления.

6. На основе диссипативной структуры «Капельный кластер» предложены принципиально новые методы микродозирования жидкостей, контроля концентрации аэрозольных частиц в воздухе, визуализации микромасштабных течений вблизи межфазной поверхности жидкость-газ.

Положения, выносимые на защиту:

1. Результаты экспериментальных исследований фотоиндуцированного термокапиллярного эффекта в тонком горизонтальном слое жидкости;

2. Концепция фотеконскопии – метода исследования жидкостей, в котором используется эффект динамической деформации межфазной поверхности жидкость-газ термокапиллярными течениями, индуцируемыми тепловыми импульсами, а источником информации служит термокапиллярный отклик;

3. Результаты исследований и конструкторских разработок, связанные с приборной реализацией фотеконскопии;

4. Приоритет открытия диссипативной структуры «Капельный кластер»;

5. Результаты исследований процессов и эффектов тепломассопереноса, обеспечивающих зарождение и устойчивое существование диссипативной структуры «Капельный кластер»;

6. Физико-математическая модель капельного кластера;

7. Практические приложения на основе нового явления – методы микродозирования жидкостей, контроля концентрации аэрозольных частиц в воздухе, визуализации микромасштабных течений жидкости и газа вблизи межфазной поверхности.

Достоверность полученных результатов обеспечивается корректностью постановки задач исследования, применением современного высокоточного научно-измерительного оборудования, хорошей воспроизводимостью экспериментальных результатов и соответствием полученных данных общепризнанным физическим представлениям о процессах тепломассопереноса в системах с развитой межфазной поверхностью жидкость-газ.

Практическое значение. В рамках диссертационной работы создана концепция принципиально нового метода исследования жидкостей – фотеконскопии. Данный метод реализован в многоцелевом анализаторе жидкостей «Фотекон-D2», технико-эксплуатационные характеристики которого подтвердили перспективность новой технологии для решения широкого спектра задач производственного контроля свойств сырьевых и технологических жидкостей. Диссипативная структура «Капельный кластер» является основой запатентованных методов микродозирования жидкостей, контроля концентрации аэрозольных частиц в воздухе, визуализации течений на межфазной поверхности жидкость-газ. Необычные свойства и доступность оборудования, используе-

мого для наблюдения явления, делают капельный кластер перспективным тестовым объектом для компьютерных программ, моделирующих процессы тепломассопереноса в задачах микромасштабной гидрогазодинамики.

В 2007 г. многоцелевой анализатор жидкостей «Фотекон-D2» успешно прошел государственную сертификацию (Сертификат соответствия № РОСС RU.АИ25.В00174).

Приборы серии «Фотекон» отмечены золотыми медалями выставок «Инвестпроектэкспо 2006» (Екатеринбург, 2006) и VII Московского международного салона инноваций и инвестиций (Москва, ВВЦ, 2007). В 2009 г. новая технология признана лучшей инновационной разработкой в Уральском федеральном округе в рамках II Всероссийского молодежного инновационного конвента.

Основные результаты работы вошли в научно-технические отчеты по грантам РФФИ (№№ 01-01-652-а, 04-02-26670-з), по программе «Старт» Фонда содействия развитию малых форм предприятий в научно-технической сфере (ГК № 4171р/6566), ФЦП «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» (ГК №№ 14.710.11.0299, 14.740.11.0641) и др.

Апробация работы. Результаты работы представлялись автором на: Международной конференции «Передовые технологии на пороге XXI века» (Москва, 1998), Международной конференции «Коллоидная химия и физико-химическая механика» (Москва, 1998), V Международной конференции «Физика в системе современного образования» (Санкт-Петербург, 1999), III Международном аэрокосмическом конгрессе IAC'2000 (Москва, 2000), First Conference of the International Marangoni Association (Giessen, Germany, 2001), IX Межотраслевом научном и методическом семинаре «Теплофизика, гидрогазодинамика, теплотехника» (Тюмень, 2002), 16-ой Европейской конференции по химии межфазных поверхностей (Владимир, 2003), II Всероссийской конференции по космическому материаловедению (Калуга, 2003), Международной конференции «Современные проблемы тепловой конвекции» (Пермь, 2003), International Marangoni Association Congress (Brussels, Belgium, 2004), Всероссийской выставке научно-технического творчества молодежи НТТМ-2005 (Москва, ВВЦ, 2005), Международной конференции «Модернизация образования в условиях глобализации» (Тюмень, 2005), III Евро-Азиатском форуме инвестиций и инноваций «Инвестпроектэкспо 2006» (Екатеринбург, 2006), VII Московском международном салоне инноваций и инвестиций (Москва, ВВЦ, 2007), Международной выставке «Интерполитех-2007» (Москва, ВВЦ, 2007), III Всероссийской конференции с участием зарубежных ученых «Задачи со свободными границами: теория, эксперимент и приложения» (Бийск, 2008), II Всероссийском молодежном инновационном конвенте (Санкт-Петербург, 2009), Всероссийской конференции «XXIX Сибирский теплофизический семинар» (Новосибирск, 2010).

Доклады по материалам диссертации были представлены на: научных семинарах физического факультета Тюменского государственного университета (председатель – академик Р.И. Нигматулин, Тюмень, 2009-2010 г.г.); научном семинаре Института криосферы Земли СО РАН (председатель – академик П.И. Мельников, Тюмень, 2010 г.); Городском гидродинамическом семинаре им. Г.З. Гершуни и Е.М. Жуховицкого (председатель – д.ф.-м.н. Д.В. Любимов, Пермь, 2010 г.); научном семинаре «Прикладная гидродинамика» Института гидродинамики им. М.А. Лаврентьева СО РАН (председатель – чл.-корр. РАН В.В. Пухначев, Новосибирск, 2010 г.); научном семинаре Института теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН (председатель – чл.-корр. РАН С.В. Алексеенко, Новосибирск, 2010 г.).

Публикации. По материалам диссертации опубликовано свыше 60 печатных работ, в том числе 13 статей в центральных российских журналах из списка ВАК, 1 монография, 21 патент РФ на изобретения.

Личный вклад автора заключается в постановке целей и задач исследования, выборе методов их решения, выполнении основной части экспериментов, анализе их результатов, руководстве инженерно-конструкторскими разработками при создании приборов, реализующих метод фотоконкопии.

Благодарности. Автор выражает благодарность доценту, к.ф.-м.н. Б.А. Безуглому, сыгравшему важную роль при выборе направления исследования, также автор признателен академику Р.И. Нигматулину, профессорам А.Б. Шабарову, А.А. Кислицыну, Э.А. Аринштейну за полезные обсуждения результатов исследований, конструктивную критику и ценные советы.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, 4 глав основного содержания, заключения, списка литературы и приложений. Содержит 267 страниц, 135 рисунков, 11 таблиц и 217 библиографических ссылок.

КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении дается обоснование актуальности тематики диссертационного исследования, ставится цель, и формулируются основные задачи, отмечается его научная новизна и практическая значимость, приводится перечень решенных в диссертации и выносимых на защиту положений.

Первая глава содержит литературный обзор работ по тематике диссертации. В ней рассмотрены типы конвективных течений, роль поверхностного натяжения и вопросы устойчивости жидкого слоя. Отдельное внимание уделено экспериментальным работам по фотоиндуцированному термокапиллярному эффекту, в частности, методам регистрации температурных полей и структуры термокапиллярного вихря, геометрии и оптическим свойствам ТК углубления.

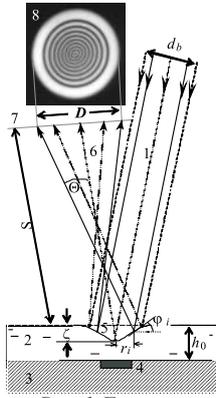


Рис. 1. Геометрия системы.

Схематично система «пучок/слой/подложка» показана на рис. 1. Здесь: 1 падающий лазерный пучок, 2 слой жидкости, 3 подложка, 4 тепловой источник, 5 ТК углубление, 6 отраженный пучок, 7 экран, 8 ТК отклик. Введены следующие обозначения геометрических характеристик системы, а также ТК углубления и отклика: d_b – диаметр лазерного пучка, h_0 – толщина слоя жидкости, S – расстояние от слоя до экрана; Θ – угол расходимости отраженного пучка, ζ – глубина ТК деформации, r_i – расстояние от оси ТК углубления до точек поверхности, в которых изменяется знак локальной кривизны поверхности. Множество этих точек образует линию перегиба, на которой уклон φ_i поверхности ТК углубления максимален и определяет расходимость отраженного пучка и диаметр ТК отклика.

Во второй главе диссертации представлены результаты экспериментальных исследований термокапиллярного эффекта, индуцируемого в тонком горизонтальном слое жидкости пространственно локализованными тепловыми импульсами.

Схема экспериментальной установки показана на рис. 2. В отличие от ранних работ, в которых ТК эффект изучался преимущественно на стадии

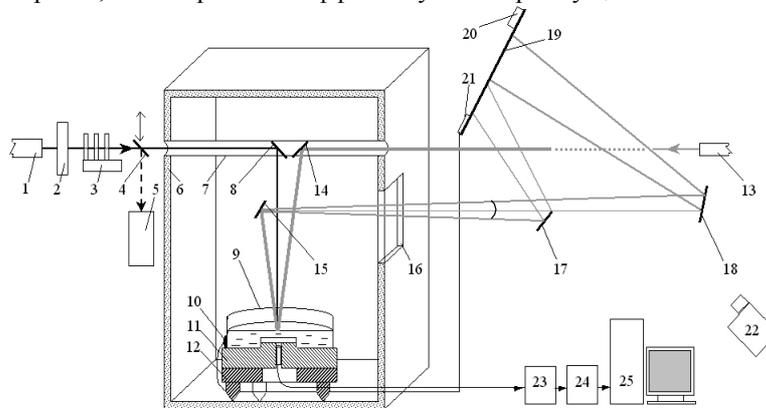


Рис. 2. Схема экспериментальной установки: 1 индуцирующий лазер (He-Ne, $\lambda = 0.633$ мкм, $P = 20$ мвт), 2 электромеханический затвор, 3 магазин светофильтров, 4 светоделительная пластинка, 5 детектор измерителя мощности ИМО-2, 6 шкаф с теплоизолированными стенками, 7 дюралева трубка, 8, 14, 15, 17, 18 зеркала, 9 кювета с жидкостью, 10 термоматчик, 11 эбонитовая платформа, 12 микрометрический треножник, 13 зондирующий лазер (He-Ne, $\lambda = 0.633$ мкм, $P = 0.4$ мвт), 16 оптическое окно, 19 экран, 20 секундомер, 21 индикатор термоматчика, 22 видеокамера, 23 усилитель сигнала фотодиода, 24 аналогово-цифровой преобразователь, 25 компьютер.

стационарного режима течений, данная установка адаптирована для исследования процессов при импульсном воздействии на слой. Особенности установки являются:

- Два независимых источника излучения, которые позволили регистрировать ТК отклик после выключения индуцирующего пучка, т.е. на стадии релаксации термокапиллярного углубления;
- Электромеханический затвор, обеспечивший возможность получения прямоугольных импульсов заданной длительности из непрерывного пучка He-Ne лазера;
- Специальная конструкция кюветы и платформы, рис. 3, адаптированная под фотоабсорбционный метод измерения глубины ТК деформации слоя;
- Схема проецирования зондирующего пучка, позволяющая получать на одном экране два синхронизированных изображения ТК отклика в разных сечениях пучка.

Более детально конструкция кюветы и платформы показаны на рис. 3. Эбонитовая платформа 1 имеет канал, в котором установлен фотодиод 2. Слой исследуемой жидкости 3 наливается в кювету 4. В опытах с окрашенной жидкостью оптическое окно 5 в дне кюветы позволяет измерять фотоабсорбционным методом глубину ТК деформации слоя. В случае прозрачной жидкости используются накладки 8 из светопоглощающих материалов. В эбонитовом кольце 6 сделаны четыре отверстия, в которые вставляются иглы 7, используемые для выставления толщины слоя, по создаваемой иглами статической деформации жидкой поверхности. Центрирующий выступ платформы позволяет извлекать кювету и возвращать ее в рабочее положение, не нарушая юстировки оптической схемы установки.

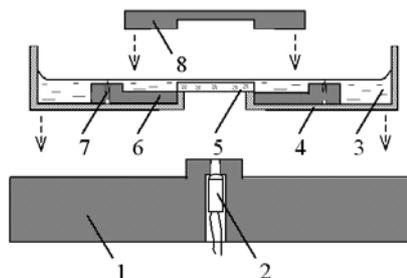


Рис. 3.

Влияние на ТК углубление и отклик способа индуцирования теплового источника (прозрачный или поглощающий излучение слой жидкости); теплофизических свойств подложки; длительности и энергии тепловых импульсов изучалось на примере бензилового спирта, который прозрачен для излучения He-Ne лазера, а также бензилового спирта, окрашенного красителем «нильский синий» (два раствора с показателями поглощения $a_{0,63 \text{ мкм}} = 45.8$ и 22.9 мм^{-1}). Применялись подложки из эбонита – органического материала с теплофизическими характеристиками, достаточно близкими к свойствам бензилового спирта, а также из стекла – материала, с примерно на порядок более высокой теплопроводностью.

Для измерения параметров ТК углубления в динамике были разработаны два взаимодополняющих метода:

- Глубина ζ ТК деформации (см. рис. 1) измерялась по изменению интенсивности света, проникающего через слой жидкости (фотоабсорбционный метод);

- Радиус r_i окружности перегиба и максимальный угол наклона поверхности ТК углубления φ_i рассчитывались по углу Θ расходимости пучка отклика, определяемому по двум изображениям ТК отклика в разных сечениях пучка.

В традиционной схеме эксперимента один и тот же лазерный пучок индуцирует конвекцию и используется для регистрации ТК отклика, что может приводить к потере информации о периферийных участках углубления, внося элемент неопределенности в результаты измерений. Диаметр ТК отклика определяется лучами, отразившимися от кольцевого участка поверхности радиусом r_i , на котором угол касательной к поверхности достигает максимума, рис. 4а. При увеличении диаметра d_{bs} зондирующего пучка диаметр ТК отклика меняется лишь до тех пор, пока выполняется условие $d_{bs} < 2r_i$. Учитывая, что область ТК деформации слоя может в несколько раз превышать площадь нагревателя, в опытах использовался зондирующий пучок, диаметр которого в плоскости слоя в три раза превышал диаметр d_{bt} индуцирующего пучка.

В работе изучено влияние на ТК отклик клиновидности жидкого слоя при негоризонтальном положении подложки, рис. 4б. Здесь: 1 индуцирующий лазерный пучок, 2 слой жидкости, 3 подложка.

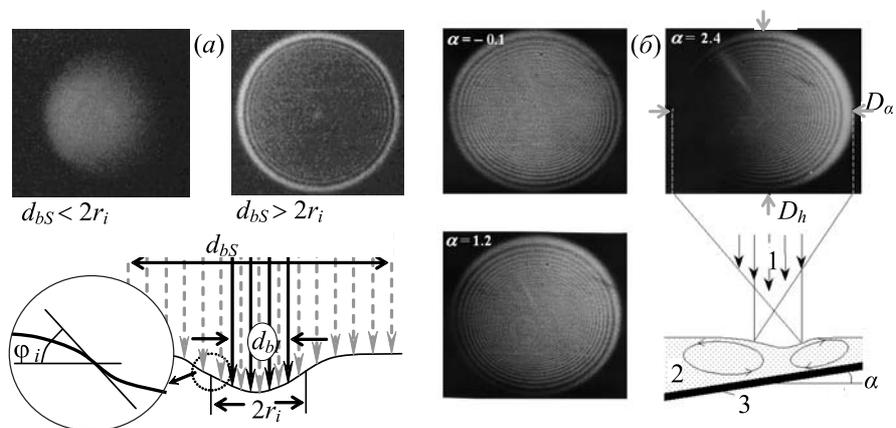


Рис. 4. Влияние на ТК отклик: (а) диаметра лазерного пучка; (б) уклона подложки.

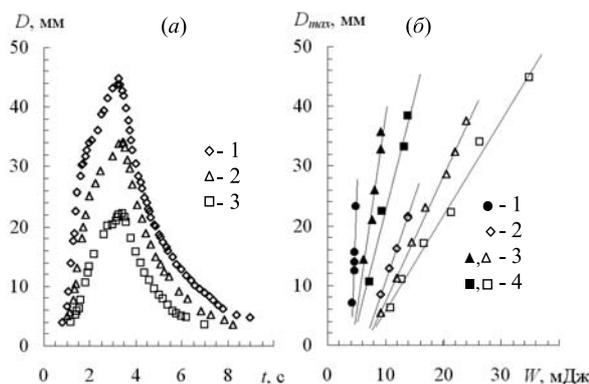
Установлено, что при уклоне подложки в пределах одного градуса ТК отклик, может быть охарактеризован взаимно перпендикулярными «диаметра-

ми», один из которых – D_h определяется локальной толщиной слоя на оси пучка, второй – D_{cs} , также зависит от уклона подложки. Эффект потемнения одного из краев ТК отклика, рис. 4б, позволяет обнаруживать отклонения подложки от горизонтали на уровне сотых долей градуса, но наблюдается лишь с ТК откликом от индуцирующего лазерного пучка⁴. Механизм эффекта поясняет рис. 4б: возрастающее сопротивление придонному притоку жидкости в направлении утончения слоя компенсируется повышением капиллярного давления из-за локального уменьшения радиуса кривизны углубления, при этом, линия перегиба смещается на периферию пучка.

Зависимость диаметра ТК отклика от мощности индуцирующего пучка на стадии установившихся течений описана в ряде работ. Поведение ТК отклика при импульсном воздействии исследовалось впервые. Опыты проводились со слоями прозрачной жидкости (бензиловый спирт марки ХЧ) на поглощающей излучение эбонитовой подложке. Одиночные импульсы заданной длительности формировались с помощью электромеханического затвора из непрерывного пучка He-Ne лазера. Суммарная энергия W , поглощаемая подложкой, изменялась за счет варьирования мощности P индуцирующего пучка и длительности τ_H импульса.

Типичный график эволюционных зависимостей ТК отклика в случае импульсного воздействия на слой приведен на рис. 5а. Обнаружено, что ход эволюционной зависимости в целом и максимально достигаемый диаметр ТК отклика D_{max} зависят не столько от суммарной тепловой энергии, выделяющейся за время облучения, сколько от мощности пучка: при одинаковых значениях W относительно короткие и мощные импульсы порождают более интенсивные течения, рис. 5б.

Рис. 5. (а) Эволюция ТК отклика при воздействии на слой одиночного импульса длительностью $\tau_H = 3.2$ с. Кривые 1, 2 и 3 соответствуют энергии импульса 35, 26 и 21 мДж; (б) Влияние длительности и энергии лазерного импульса на максимальный диаметр отклика. Бензиловый спирт, зачерненные маркеры – $h_0 = 450$ мкм, светлые – $h_0 = 500$ мкм. Маркеры 1, 2, 3 и 4 соответствуют $\tau_H = 0.7, 1.2, 2.2$ и 3.2 с.



⁴ При использовании широкого зондирующего пучка эффект потемнения не наблюдается и происходит лишь характерное искажение формы ТК отклика.

В общей сложности были проведены десятки экспериментов, в ходе которых варьировались параметры зондирующего пучка, толщина слоя жидкости, энергетические и геометрические характеристики теплового источника, индуцирующего термокапиллярные течения. Примеры типичных эволюционных зависимостей параметров ТК углубления и отклика приведены на рис. 6. Обобщение полученных экспериментальных данных позволило сделать ряд выводов, касающихся концепции фотеконскопии и приборной реализации нового метода:

1. С точки зрения использования ТК отклика в качестве источника информации о свойствах жидкости, способ нагрева тепловым действием света, имеет принципиальный недостаток – ярко выраженную зависимость энергетических и геометрических параметров индуцируемого источника тепла от коэффициента поглощения излучения жидкости. Это осложняет техническую реализацию базового принципа – проведение измерений в воспроизводимых, строго контролируемых условиях.

2. Влияние свойств жидкости проявляется на всех участках эволюционной зависимости ТК отклика, что позволяет использовать короткие тепловые импульсы.

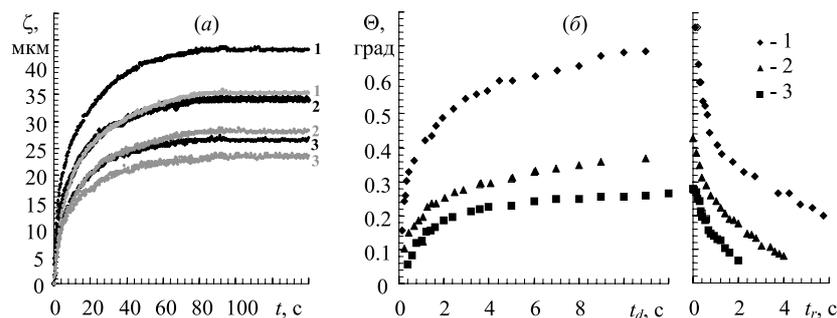


Рис. 6. Примеры эволюционных зависимостей. (а) Развитие ТК деформации с момента начала облучения слоя. Окрашенный бензиловый спирт, $a_{0.63 \text{ мкм}} = 22.9 \text{ мм}^{-1}$. Черные маркеры – $h_0 = 230 \text{ мкм}$, серые – 280 мкм . Зависимости 1, 2 и 3 соответствуют интенсивности пучка $I_w = 2.4, 2.1$ и $1.7 \text{ мВт}/\text{мм}^2$; (б) Развитие и релаксация ТК отклика. Слой бензинового спирта на эбонитовой подложке, $h_0 = 380 \text{ мкм}$, 1, 2 и 3 соответствуют $I_w = 2.4, 0.9$ и $0.4 \text{ мВт}/\text{мм}^2$

3. Приборная реализация фотеконскопии требует поиска эффективных решений ряда проблем научного, технического и методического характера, в числе которых:

- Герметизация и термостатирование образца жидкости;
- Защита прибора от воздействий химически агрессивных компонентов анализируемых жидкостей;
- Высокоточный контроль толщины слоя анализируемой жидкости;

г) Жесткие требования к уровню воспроизводимости временных и энергетических параметров тепловых импульсов;

д) Комплекс проблем в области автоматизации и компьютеризации процесса регистрации зависимостей ТК отклика, хранения и обработки экспериментальных данных.

В третьей главе диссертации представлены результаты научных исследований и опытных конструкторских разработок, связанные с развитием концепции и приборной реализацией фотеконскопии – принципиально нового метода экспресс-идентификации и анализа жидкостей.

Принцип измерений методом фотеконскопии состоит в том, что на исследуемый образец (в виде тонкого горизонтального слоя жидкости со свободной поверхностью) оказывается воздействие тепловыми импульсами от нагревателя на дне слоя. Под действием импульсов развиваются нестационарные термокапиллярные течения, которые вызывают динамическую деформацию свободной поверхности слоя. Основным источником информации о жидкости служит фотеконограмма – зависимость, описывающая изменения диаметра ТК отклика во времени.

На рис. 7 приведен пример фотеконограммы и схематично показан ход лучей, отраженных от жидкой поверхности (f – фокусное расстояние ТК углубления, S – расстояние от жидкой поверхности до экрана). При всем разнообразии индивидуальных особенностей фотеконограмм, на любой зависимости прослеживаются три последовательных участка: I – от плоской, недеформированной ТК течениями жидкой поверхности;

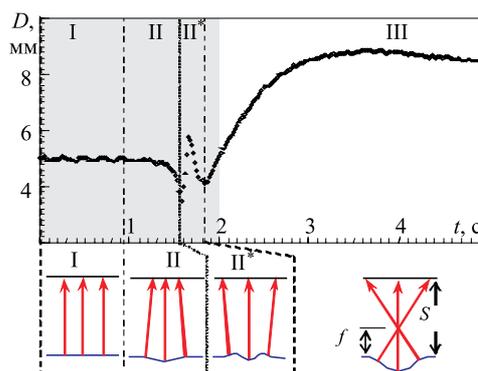


Рис. 7. Стадии развития фотеконограммы.

II. Незначительная деформация поверхности, диаметр отклика определяют не скрещенные лучи ($S \leq f$);

III. Выраженное ТК углубление, диаметр отклика определяют скрещенные лучи ($S > f$).

Для многих, но не для всех жидкостей также характерен эффект «всплеска» – кратковременное увеличение диаметра ТК отклика (на рис. 7 соответствующий участок фотеконограммы обозначен II*). Этот эффект дает торoidalный валик, образующийся на начальной стадии развития течений.

Комплекс параметров теплового воздействия на образец: число импульсов, их мощность P_H и длительность t_H , а также, продолжительность пауз, разделяющих импульсы, далее будет называться режимом воздействия. Очевидно, что сравнение фотеконотрамм является корректным лишь при условии, что они получены при одном и том же режиме воздействия.

В 2007 г. многоцелевой анализатор жидкостей «Фотекон-D2», рис. 8, успешно прошел государственную сертификацию. На этом приборе проводился основной объем работ, связанных с совершенствованием процедуры измерений, отработкой методик идентификации и анализа показателей качества⁵ различных классов жидкостей. Существование воспроизводимых и индивидуализируемых фотеконотрамм свидетельствует о принципиальной возможности расчета физических свойств жидкости по фотеконотрамме, однако, решение обратной задачи фотеконотрапии, выходит за рамки данного диссертационного исследования.

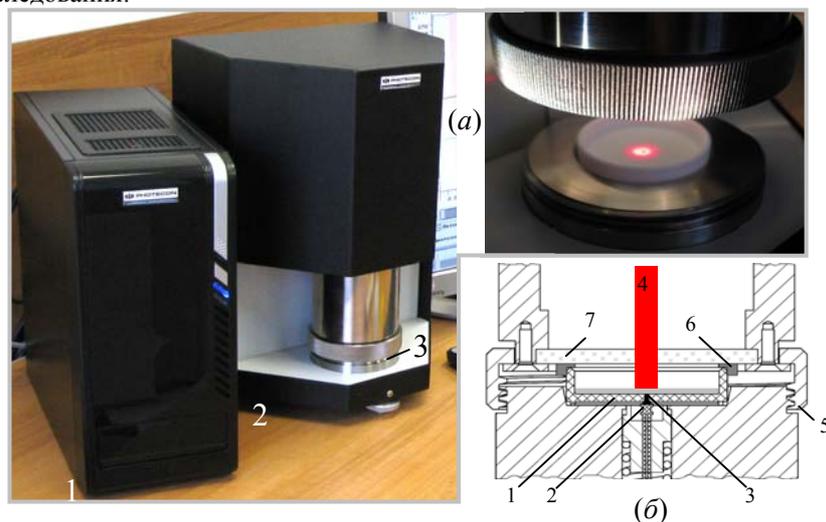


Рис. 8. (а) Анализатор жидкостей «Фотекон-D2»: 1 и 2 – компьютерный и измерительный блоки, 3 – термостатируемая измерительная ячейка (дополнительно приведена фотография ячейки в открытом положении); (б) Конструкция измерительной ячейки: 1 – кювета с образцом жидкости, 2 – нагреватель, 3 – теплопроводящий элемент, 4 – лазерный пучок, 5 – прижимная гайка, 6 – уплотнитель, 7 – покрывное стекло.

⁵ Понятие «качество жидкости» трактуется, в контексте более общего определения, которое дается Российским энциклопедическим словарем: «Качество продукции – совокупность свойств (в том числе мера полезности) продукции, обуславливающих её способность удовлетворять определенные общественные и личные потребности».

Конструктивно анализатор состоит из компьютерного и измерительного блоков, выполненных в отдельных корпусах. Анализируемый образец жидкости объемом ~1 мл наливается в цилиндрическую кювету, изготовленную из химически инертного материала (фторопласт-4). В дне кюветы имеется теплопроводящий элемент (Т-элемент) – стерженек из нержавеющей стали диаметром 1 и длиной 2 мм, рис. 8б. Кювета устанавливается в измерительную ячейку прибора и, вращением прижимной гайки, зажимается между основанием измерительной ячейки и покровным стеклом. Кольцевой уплотнитель из силиконовой резины обеспечивает герметичность полости внутри кюветы. В качестве нагревателя используется миниатюрный элемент Пельтье, закрепленный на подпружиненном основании (таким образом, при фиксации кюветы в измерительной ячейке обеспечивается фиксированное прижимное усилие и хороший тепловой контакт нагревателя и Т-элемента). Термокапиллярная деформация жидкой поверхности индуцируется тепловыми импульсами от нагревателя, а считается зондирующим лазерным пучком, мощность которого заведомо недостаточна для создания сколько-нибудь выраженного нагрева жидкости. Благодаря системе из датчиков температуры и нагревательных элементов, управляемых компьютером, массив металла измерительной ячейки выполняет роль твердотельного термостата.

Конструкция анализатора позволяет исследовать жидкости в стабильных, хорошо воспроизводимых условиях. Все элементы прибора, с которыми контактирует жидкость и ее пары, изготавливаются из материалов, отличающихся повышенной стойкостью к воздействию кислот, щелочей, органических растворителей. Это максимально расширяет спектр анализируемых жидкостей и сводит к минимуму вероятность выхода прибора из строя при анализе образцов неизвестного химического состава.

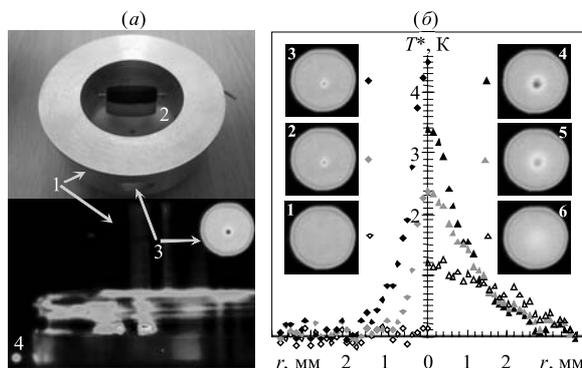
В анализаторах «Фотекон-D2» реализован импульсный режим питания нагревателя с несущей частотой 1 кГц и фиксированным напряжением U_H . Из-за инертности, нагреватель сглаживает пульсации напряжения и генерирует практически постоянный тепловой поток, мощностью которого можно управлять изменением скважности импульсов. В этом случае максимальный тепловой поток (обозначим его мощность P_{H0}) соответствует единичной скважности и при описании режима воздействия мощность P_H нагревателя удобно выражать в процентах от P_{H0} .

На рис. 9-10 приведены экспериментальные результаты, полученные с использованием тепловизора Titanium 570M (спектральный диапазон 3.7-4.8 мкм, матрица 640x512 пикс, размер пикселя 15 мкм, точность измерения $T \pm 1\%$, NETD < 25 мК).

На ИК изображении, рис. 9а, виден участок дна кюветы с «горячим» Т-элементом в центре, закрепленный на корпусе прибора ИК светодиод (индика-

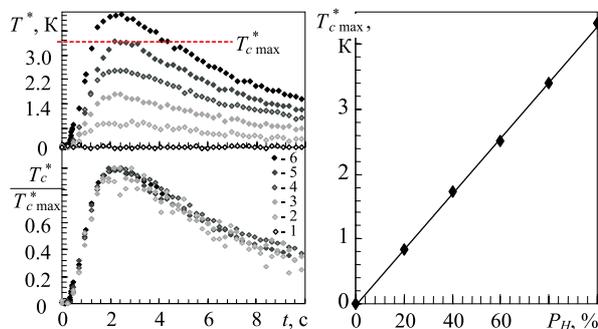
тор моментов включения/выключения нагревателя), а также контуры термостата и цилиндрической вставки (тепловизор существенно занижает температуру этих элементов, так как их металлические поверхности не зачернены). Рис. 9б демонстрирует трансформацию распределения температуры Т-элемента и прилегающих участков дна кюветы при подаче теплового импульса (для корректного отображения температуры на дно кюветы нанесено светопоглощающее покрытие).

Рис. 9. (а) Вставка, используемая для регистрации поля температур: 1 корпус, 2 зеркало, 3 оптическое окно, 4 ИК диод; (б) Эволюция поля температур. Параметры импульса: $P_H = 100\%$, $t_H = 1$ с. Под номерами 1, 2, 3, 4, 5 и 6 показаны распределения $T^*(r)$ через 0.04, 0.96, 2.32, 4.7, 7.14, и 10 секунд с момента включения нагревателя.



Эволюционные кривые температуры на оси Т-элемента (с поправкой на температуру T_0 термостатирования образца $T_c^* = T_c - T_0$), при разной мощности P_H нагревателя показаны на рис. 10а. Зависимость $T_{c\max}^*(P_H)$, рис. 10б, обобщает данные рис. 10а.

Рис. 10. (а) Эволюционные зависимости температуры T_c^* при разной мощности нагревателя. Маркеры 1, 2, 3, 4, 5 и 6 соответствуют $P_H = 0, 20, 40, 60, 80$ и 100% . Длительность импульса 1 с; (б) Зависимость максимальной температуры на оси нагревателя от его мощности.



Из данных, полученных с использованием тепловизора, следует:

1. Система термостатирования измерительной ячейки прибора, обеспечивает поддержание пространственной однородности температуры образца с точностью ± 0.05 К, в эти же пределы укладывается и временной дрейф температуры;

2. Локальное повышение температуры образца под действием тепловых импульсов не превышает нескольких Кельвинов, что сводит к минимуму вероятность необратимых изменений физико-химических свойств образца в процессе измерения;

3. Мощность тепловых импульсов, воздействующих на образец, прямо пропорциональна контролируемой с высокой точностью электрической мощности нагревателя;

4. Приборная задержка с момента подачи напряжения на нагреватель до начала повышения температуры торцевой поверхности Т-элемента составляет 0.3 ± 0.04 с;

5. Характерное время релаксации теплового импульса после выключения нагревателя не превышает нескольких десятков секунд.

Эти данные подтверждают хорошие технические характеристики ключевых, с точки зрения метрологии, систем анализатора – системы термостатирования образца и управления тепловыми импульсами.

Интенсивность ТК течений связана с такими сильно варьирующимися от жидкости к жидкости параметрами, как поверхностное натяжение и вязкость⁶, поэтому, не существует универсального режима воздействия. Одинаковые тепловые импульсы, в одной жидкости могут инициировать прорыв слоя, в другой – вызывать лишь слабовыраженную деформацию поверхности. И в том и в другом случае страдает информативность фотеконотраграмм. Диапазон изменения мощности и длительности тепловых импульсов, воспроизводимых прибором «Фотекон-D2», рассчитан на получение информативных фотеконотраграмм широкого спектра сырьевых и технологических жидкостей (нефть, нефтепродукты, спирты, гликоли, деэмульгаторы и т.д.).

Вне зависимости от индивидуальных особенностей жидкости и решаемой задачи, существуют несколько общих – базовых условий, нарушение которых отражается на достоверности и воспроизводимости результатов измерений. К ним относятся:

1. Сравнимые фотеконотраграммы должны быть получены для образцов при одинаковой температуре термостатирования;

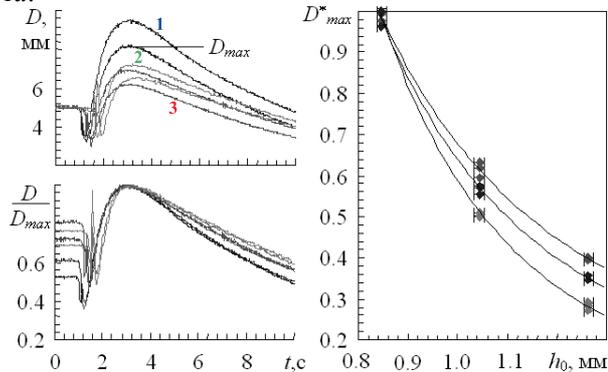
2. Неконтролируемые вариации толщины слоя жидкости при заливке пробы в измерительную кювету должны быть минимизированы;

3. Перед запуском измерения, жидкость и газовая среда в кювете должны быть в состоянии близком к термодинамическому равновесию (отсутствие выраженных температурных градиентов, течений, активного испарения с поверхности слоя).

⁶ Например, при 20 °С вязкость октана и глицерина – наименее и наиболее вязких жидкостей, для которых были получены фотеконотраграммы, отличается более чем в 1000 раз.

Высокая чувствительность ТК отклика к толщине h_0 жидкого слоя являлась серьезной проблемой, поскольку прямой контроль h_0 с точностью до сотых долей мм сопряжен с существенным удорожанием приборной реализации метода и усложнением процедуры измерений. Решение проблемы появилось в результате обобщения экспериментальных данных: вне зависимости от состава жидкости фотеконogramмы совпадают⁷ в нормированном на индивидуальные значения D_{max} виде, при условии, что вариации толщины слоя не превышают десятых долей мм, рис. 11а.

Рис. 11. (а) Пример фотеконogramм до и после нормировки на индивидуальное, для каждой фотеконogramмы, значение D_{max} : 1 – октан, 2 – изопропанол, 3 – декан (в каждой паре ненормированных фотеконogramм выше проходит зависимость при толщине слоя 1.05, ниже при 1.25 ± 0.01 мм); (б) Зависимость диаметра D_{max} от толщины слоя жидкости: 1 – октан, 2 – изопропанол, 3 – декан.



Вариации толщины слоя при анализе жидкостей могут быть обусловлены двумя основными причинами: разбросом диаметра рабочей полости кювет и погрешностью дозирования жидкости. Исходя из параметров используемых кювет (рабочая полость диаметром 35 ± 0.05 мм) и микродозаторов (Ленпипет Степпер, погрешность на уровне 5%), при разных заливках жидкости в одну и ту же кювету погрешность h_0 не должна превышать ± 0.05 мм, а при использовании разных кювет ± 0.06 мм.

О точности выставления h_0 , реализующейся в эксперименте, можно судить по графику зависимостей D_{max} от толщины слоя, рис. 11б (зависимости нормированы на значения D_{max} при минимальной, в рамках серии опытов, толщине слоя). Положение экспериментальных точек свидетельствует о том, что фактическая погрешность выставления толщины слоя составляет ± 0.015 мм.

Из третьего базового условия следует, что после установки кюветы с пробой в термостат прибора первое измерение должно запускаться с определенной задержкой, а при записи серии фотеконogramм, между измерениями должен выдерживаться временной интервал τ_{ser} , необходимый для релаксации последствий тепловых импульсов.

⁷ Неизбежное при нормировке на D_{max} расхождение начальных участков фотеконogramм не имеет большого значения в силу их малой информативности, рис. 7.

Увеличение продолжительности интервалов τ_{ser} способствует более точному выполнению третьего условия, но замедляет процесс измерения. Поэтому на практике применялся следующий подход: при разработке процедуры измерения для нового класса жидкостей регистрировалась серия фотеконотграмм с пошагово возрастающим τ_{ser} . Начиная с некоторого шага, более раннее измерение переставало влиять на последующее, и определенный таким способом временной интервал вносился в описание процедуры анализа для данного класса жидкостей. Для всех изученных жидкостей и режимов воздействий хорошая воспроизводимость фотеконотграмм наблюдалась при длительности интервала между измерениями от двух до десяти минут.

Программное обеспечение анализатора позволяет регистрировать серии фотеконотграмм в автоматическом режиме, для чего в специальном окне задается время задержки запуска, число измерений и интервал между ними.

Выбор методики измерений зависит от решаемых задач, которые целесообразно классифицировать по типу получаемой информации и характерным особенностям фотеконотграмм анализируемых жидкостей (табл. 1).

Фотеконотграммы типа «А» характерны для химически чистых жидкостей, а также смесей, не содержащих ПАВ. Стабильно-переменные фотеконотграммы, как правило, наблюдаются, если жидкость содержит поверхностно-активные компоненты, постепенно адсорбирующиеся на свободной поверхности образца. Нестабильные фотеконотграммы характерны для жидкостей, имеющих инородные включения – твердые частицы, капли других жидкостей и т.д., воздействие которых на ТК вихрь имеет случайный характер. Этот тип фотеконотграмм чаще всего свидетельствуют о низком качестве жидкости, либо, о загрязненности образца.

Пример 1. Экспресс-идентификация образцов товарной нефти.

Нефть, в состав которой может входить несколько сотен различных органических и неорганических веществ, является одной из наиболее сложных для идентификации жидкостей. В рамках поставленных модельных экспериментов шесть образцов западносибирской товарной нефти из разных месторождений случайным образом распределялись по семи идентичным пронумерованным емкостям. Ставилась задача, определения двух емкостей, содержащих одну и ту же нефть. Параллельно с методом фотеконоткопии образцы исследовались на газохроматографическом оборудовании методом имитированной дистилляции.

В основе стандартной процедуры идентификации лежит разностная кривая, рис. 12, получаемая при поточечном вычитании нормированных фотеконотграмм:

$$\Delta D_{nm}(t_1) = D_n(t_1) - D_m(t_1), \Delta D_{nm}(t_2) = D_n(t_2) - D_m(t_2) \dots, \quad (1)$$

где $D_n(t)$ и $D_m(t)$ диаметры ТК откликов в совпадающие моменты времени. Чем сильнее отличия, тем больше у разностной кривой амплитуда отклоне-

ний от нулевых значений. В качестве количественных характеристик введем параметры:

$$П1 = |\Delta D|_{cp}, \quad П2 = |\Delta D|_{max}. \quad (2)$$

Таблица 1

Классификация задач фотеконскопии

Тип измерения	I. Экспресс-идентификация (подтверждение идентичности) образцов жидкостей, сложного или неизвестного химического состава методом сравнения фотеконскограмм.	
	II. Мультипараметрический качественный экспресс-анализ жидкостей (установление принадлежности образца определенному классу жидкостей, с варьируемыми в некотором диапазоне физико-химическими свойствами).	
	III. Количественный анализ химического состава жидкости.	
	IV. Измерение физических свойств жидкости по фотеконскограмме.	
Тип фотеконскограммы	A. Стабильные (серия измерений с интервалом τ_{ser} дает фотеконскограммы, совпадающие в пределах погрешности измерений).	
	B. Стабильно-переменные (фотеконскограмма в рамках серии измерений претерпевает однотипные, воспроизводимые от серии к серии трансформации).	
	C. Нестабильные (последовательные измерения дают фотеконскограммы, подверженные неконтролируемым, случайным вариациям).	

Пороговые значения П1 и П2, превышение которых может свидетельствовать о неидентичности образцов, зависят от множества факторов, и прежде всего – от воспроизводимости фотеконскограмм в условиях задачи.

В случае нефти, среднестатистические значения параметров П1 и П2 по результатам нескольких измерений с одним образцом, рис. 12а, составили: $\langle П1 \rangle = 0.52\%$, $\langle П2 \rangle = 1.64\%$, при этом, 95 % измерений удовлетворяли условию: $П1 \leq 0.75$, $П2 \leq 2.20$. Эти значения будем рассматривать, как пороговые. Пример разностных кривых, полученных при сравнении фотеконнограмм для разных образцов нефти, показан на рис. 12б. Полный же набор значений параметров П1 и П2 приведен в табл. 2.

Рис. 12. Разностные кривые: (а) Вариабельность фотеконнограмм в рамках серии измерений с одним образцом нефти – семь серий (по числу емкостей с образцами) по три измерения в каждой; (б) Результат сравнения разных образцов нефти.

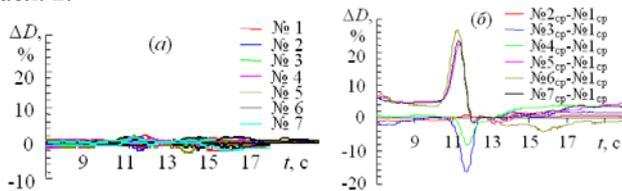


Таблица 2

Результаты сравнения фотеконнограмм

	№1	№2	№3	№4	№5	№6
№2	0,63 1,70					
№3	1,91 16,60	1,57 17,46				
№4	2,27 8,27	2,15 9,17	2,00 8,77			
№5	3,93 22,30	3,94 22,16	4,68 32,5	3,89 25,30		
№6	4,25 26,6	4,74 26,57	5,99 34,00	6,10 27,97	2,65 8,20	
№7	3,93 23,50	3,92 23,37	4,64 32,63	3,59 25,87	0,96 3,07	2,78 6,07

Как следует из таблицы, идентичными являются образцы №1 и №2 (параметры разностной кривой П1 = 0.63 и П2 = 1.70 ниже пороговых значений). Аналогичный вывод был сделан и на основании хроматографического исследования.

Пример 2. Контроль качества жидкостей для стеклоомывателей.

Методики мультипараметрического экспресс-контроля показателей качества жидкости эффективны в тех случаях, когда в рамках анализируемого класса состав жидкости регламентируется нормативными документами (ГОСТом, ТУ и т.п.). В силу близости состава, качественные жидкости имеют однотипные фотеконнограммы, что позволяет устанавливать границы допустимой вариабельности фотеконнограмм.

В качестве примера, рассмотрим результаты экспериментов с жидкостями для стеклоомывателей, основными компонентами которых являются: вода, спирт (понижает температуру замерзания), ПАВ, красители и ароматические добавки. При производстве таких жидкостей категорически запрещено использовать метанол, в то же время, по оценкам экспертов, в отдельных российских регионах доля на рынке контрафактных жидкостей на основе метанола приближается к 50%.

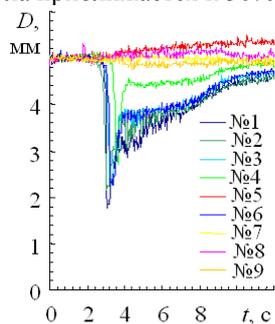


Рис. 13.

В рамках исследования были получены фотеконogramмы девяти образцов жидкостей для стеклоомывателей разных торговых марок, рис. 13. Параллельно, методом газовой хроматографии определялось содержание в жидкостях спиртов (разрешенных – изопропанола и этанола и запрещенного метанола), Таблица 3.

Сопоставление данных показывает, что запрещенные, содержащие метанол жидкости, могут выявляться по выраженным структурным отличиям их фотеконogramм, не маскируемым присутствием красителей, ПАВ и ароматических добавок.

Таблица 3

Состав образцов жидкостей для стеклоомывателей

Состав Образец	Вода, %	Изопро- панол, %	Эта- нол, %	Мета- нол, %	Этиленг- ликоль, %
№1	22.9	74.6	-	-	2.5
№2	43.7	52.2	2.6	-	1.5
№3	41.2	58.8	-	-	-
№4	64.4	4.5	31.0	0.1	-
№5	78.8	0.2	0.2	20.8	-
№6	51.6	48.2	0.1	0.1	-
№7	77.0	0.3	0.1	22.6	-
№8	75.2	0.2	0.1	24.5	-
№9	78.8	0.2	0.1	20.9	-

Созданный приборный комплекс, обладает практически важными качествами:

- Экспрессный режим измерения – вне зависимости от сложности состава жидкости, продолжительность анализа не превышает нескольких минут;
- Унифицированность – возможность анализа максимально разнообразных сырьевых и технологических жидкостей;
- Минимальные эксплуатационные издержки, обусловленные отсутствием затрат на дорогостоящие расходные материалы;

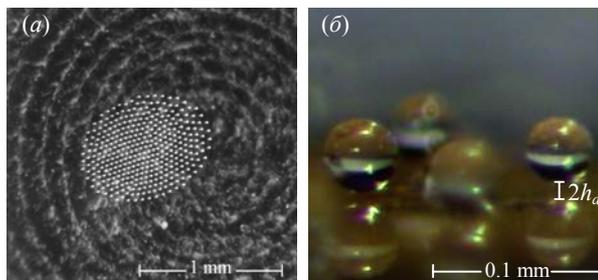
- Небольшой объем пробы анализируемой жидкости – порядка 1 мл;
- Автоматизированный процесс измерения и процедура обработки данных;
- Уникальная процедура идентификации, позволяющая достоверно обнаруживать неидентичность анализируемой пробы и эталонного образца в ситуациях, когда неизвестен даже примерный состав жидкости и нетривиален сам выбор методов анализа;
- Отсутствие жестких требований к уровню квалификации лаборантов.

Фактически, анализаторы «Фотекон-D2», могут эксплуатироваться в режиме «офисного оборудования» (т.е. без организации полноценной лаборатории с высококвалифицированным персоналом), что открывает принципиально новые возможности для внедрения на предприятиях (в том числе малых) новых методик производственного контроля технологических процессов.

В четвертой главе представлены результаты исследований открытого автором природного явления – диссипативной структуры «Капельный кластер».

Капельный кластер был впервые зарегистрирован в ходе исследований фотоиндуцированных термокапиллярных течений. В одном из опытов с тонким открытым слоем воды в поглощающей свет эбонитовой кювете сфокусированный пучок света вызвал нагрев жидкости и появление паро-воздушного конвективного факела, в котором активно зарождались микрокапли конденсата. Подавляющее большинство микрокапель уносилось конвективным потоком, но наиболее крупные капли выпадали на свободную поверхность слоя. Эти капли в течение многих минут не коалесцировали с жидкой поверхностью, собираясь в упорядоченную гексагональную структуру, рис. 14а. Фактически, рис. 14б, капли левитировали над жидкой поверхностью на расстоянии, h_d , сопоставимом с диаметром капли.

Рис. 14. (а) Одна из первых фотографий капельного кластера. Концентрические дорожки – результат токарной обработки кюветы; (б) Кластер при горизонтальном положении микроскопа. Под каплями видны их отражения от жидкой поверхности.



Явление имеет тепловую природу (свет – один из возможных источников нагрева жидкости) и, помимо воды, может воспроизводиться с рядом органических жидкостей с высоким поверхностным натяжением: глицерином, этиленгликолем, водными растворами спиртов и др. В опытах с эбонитовой кюветой кластер образовывался лишь в случае достаточно тонкого жидкого слоя.

Однако, если способ подвода тепла обеспечивает непосредственный нагрев межфазной поверхности жидкость-газ, толщина слоя жидкости утрачивает значение.

Существует пороговая температура жидкости в области нагрева, ниже которой капельный кластер не формируется – выпадающие на жидкую поверхность капли конденсата коалесцируют со слоем. Например, при атмосферном давлении и температуре окружающего воздуха порядка 20...25 °С, минимальная температура слоя воды, на поверхности которого может сформироваться капельный кластер, должна быть выше 50 °С. Верхний предел температурного диапазона существования капельного кластера ограничивается температурой кипения жидкости.

Находясь в кластере, капли со временем увеличиваются в размере, при этом, скорость роста и максимально достигаемый диаметр капель прямо пропорциональны температуре T_S жидкой поверхности. При низких значениях T_S , наблюдаются капли диаметром $d \sim 15...20$ мкм, в то время, как при $T_S > 80$ °С диаметр капель может превышать 100 мкм. Учитывая относительно невысокую разрешающую способность стереомикроскопа⁸, рабочий диапазон мощности нагревателя выбирался из условия: 60 °С $< T_S < 95$ °С, т.о. основным объектом исследования были кластеры, состоящие из капель диаметром 40 и более мкм.

Принципиально важным условием для возникновения капельного кластера является локальный нагрев жидкости. При однородном нагреве жидкой поверхности можно наблюдать родственное капельному кластеру явление, которое легко воспроизводится в обычной кружке с чаем или кофе⁹. Если температура напитка достаточно высокая, над жидкой поверхностью возникает характерный узор из светлых многоугольников неправильной формы, ограниченных узкими темными линиями. Такой узор сформирован из выпавших на жидкую поверхность микрокапель конденсата, устойчивость к коалесценции которых объясняется действием потоков Стефана.

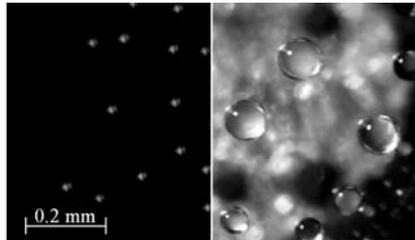


Рис. 15. Капли над поверхностью воды: слева – однородный нагрев до 90 °С; справа – локальный нагрев – над центром нагревателя 90 °С, на периферии 25 °С.

Незначительная, на первый взгляд, трансформация условий эксперимента – переход от однородно нагретой протя-

⁸ Оптические микроскопы других типов обладают более высокой разрешающей способностью, но имеют малую глубину резкости изображения.

⁹ Шефер В. Наблюдения над утренней чашкой кофе // Успехи физических наук. – 1972. – № 3. – С. 577-580.

женной поверхности к локализованному источнику тепла, качественно изменяет режим тепломассообмена на межфазной границе, обеспечивая условия для формирования капельного кластера. Даже при визуальном наблюдении (см. рис. 15), у рассматриваемых явлений обнаруживаются выраженные отличия (табл. 4), причины которых будут проанализированы в дальнейшем.

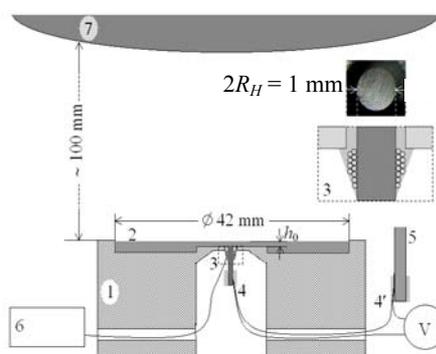
Таблица 4

Микрокапли над поверхностью испаряющейся жидкости

Характеристика	Протяженная нагретая поверхность	Локализованный источник тепла
Взаимное расположение капель	Хаотичное	Упорядоченная гексагональная структура
Диаметр капли	~ 10...15 мкм	От 20 до 100 и более мкм
Расстояние от жидкой поверхности	В непосредственной близости	Может быть сопоставимым с диаметром капли

Радиационный способ нагрева жидкости (тепловым действием света) имеет ряд недостатков: он технически сложен для управления и контроля мощностью и распределением температуры индуцируемого теплового источника; индуцирующий световой пучок затрудняет регулировку режима освещения капельного кластера, что неблагоприятно отражается на качестве видеозаписи и др. Поэтому, в большинстве экспериментов, применялся способ нагрева жидкости встроенным в дно кюветы нагревателем, рис. 16.

Рис. 16. Схема установки: 1 – дюралева кювета; 2 – слой жидкости; 3 – нагреватель, генерирующий капельный кластер; 4 и 4' – спаи медь-константановой термопары; 5 – щуп цифрового термометра; 6 – регулируемый низковольтный источник напряжения; 7 – внешняя линза объектива стереомикроскопа МБС-10 (при наблюдении кластера в видимом диапазоне), либо – линза тепловизора Titanium 570M (при регистрации полей температуры).



На вставке более подробно показана конструкция типового нагревателя: это вклеенный в дно кюветы на эпоксидную смолу цилиндрический медный стержень радиусом R_H . На стержень навита лакированная нихромовая проволока, разогреваемая при пропускании электрического тока. Диаметр отверстия в дне кюветы на 1 мм превышает диаметр нагревателя. Благодаря этому, эпоксидная смола создает оболочку, которая изолирует нагреватель от металлического корпуса кюветы, обеспечивая локальность нагрева.

В случае размещения нагревателя на уровне дна кюветы, тепловое поле на свободной поверхности слоя зависит от его толщины h_0 . В опытах с капельным кластером h_0 определялась объемом жидкости, наливаемой в кювету с помощью высокоточного дозатора. Большинство экспериментов проводилось при $h_0 = 380$ мкм (объем жидкости 2.1 мл), которая в дальнейшем будет считаться стандартной.

Испарение неизбежно влияет на толщину слоя, однако, характерная для описываемых опытов скорость испарения такова, что за 10 мин работы нагревателя на максимальной мощности толщина слоя снижается не более чем на 5% от исходной. Это позволяет проводить множество экспериментов без использования технически сложных средств поддержания толщины слоя.

Пример ИК изображения поверхности слоя жидкости в области нагревателя показан на рис. 17а. Характеристики тепловых полей на свободной поверхности жидкости при минимальной, средней и максимальной (в пределах рабочего диапазона) мощности нагревателя отражает график на рис. 17б. Здесь, пространственная координата пронормирована на радиус нагревателя R_H , а температура – на индивидуальные значения для каждой зависимости значения T_{Smax} .

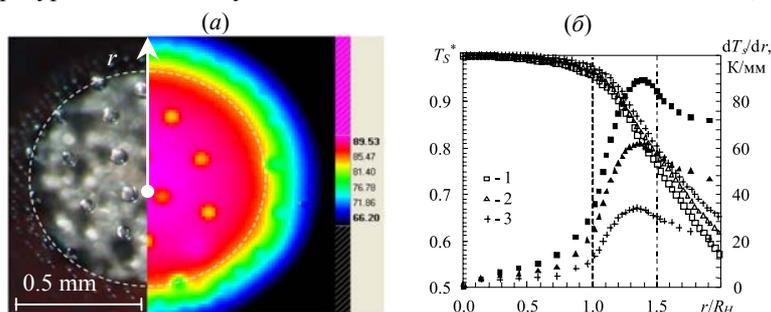


Рис. 17. (а) Капельный кластер в видимом и ИК диапазонах. Граница нагревателя показана штриховой линией; (б) Зависимость температуры (светлые маркеры) и радиального градиента температуры на жидкой поверхности (зачерненные маркеры) от расстояния до центра нагревателя. Температура T_{Smax} и электрическая мощность, P , нагревателя: 1 – 93 °С, 0.72 Вт, 2 – 83 °С, 0.39 Вт, 3 – 69 °С, 0.17 Вт.

Во всем рабочем диапазоне мощности нагревателя температурное распределение на жидкой поверхности не претерпевает качественных перестроек. Как и следовало ожидать, источник тепла четко локализован и наиболее резкий спад температуры приходится на окружающий нагреватель слой эпоксидной смолы. В области существования кластера температура плавно снижается по мере удаления от центра нагревателя, при этом, перепад температур в пределах области не превышает 5% от T_{Smax} .

Параметры теплового поля в газовой среде над жидкой поверхностью изучались в экспериментах с термохромной пленкой, рис. 18. Здесь: 1 металличес-

ская кювета с внутренними каналами, сообщающимися с внешним контуром жидкостного термостата; на дне кюветы закреплен алюминиевый цилиндр 2 со встроенным нагревателем (во время опытов верхний торец цилиндра скрыт тонким слоем жидкости). Изображение температурного поля в газовой среде визуализируется термохромной пленкой 3, а записывается с помощью горизонтально расположенного стереомикроскопа 4, оборудованного специализированной телекамерой.

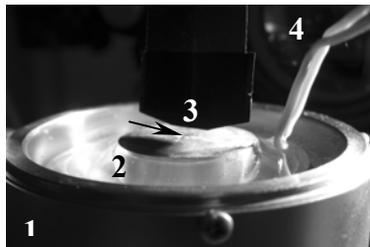


Рис. 18.

Температурные поля, визуализированные термохромной пленкой, показаны на рис. 19а: слева – над однородным по температуре слоем (кювета и вода в ней прогреты за счет прокачки теплоносителя, нагреватель выключен); справа – при локальном нагреве¹⁰ (кювета и основной объем жидкости при комнатной температуре, нагреватель включен). Положение границы раздела фаз (по ней проведена ось r) соответствует середине зазора между нижним краем термохромной пленки и его отражением в воде. На рис. 19б приведен график зависимостей температуры газовой среды, T_g , от расстояния до жидкой поверхности, построенный по данным рис. 19а. Из него следует, что $\text{grad } T_{gz}$ над однородно нагретой до температуры T_s жидкой поверхностью в четыре раза меньше, чем аналогичный градиент над локально нагретой поверхностью, у которой максимальная температура равна T_s .

Капельный кластер существует над неоднородно нагретой, но в тоже время практически неподвижной межфазной поверхностью. Это возможно лишь в жидкостях с высоким поверхностным натяжением, в которых термокапиллярные течения могут эффективно подавляться действием поверхностно-активных веществ (ПАВ). Опытные данные свидетельствуют, что капельные кластеры могут быть получены с использованием воды любых природных источников, в частности, представленные в работе результаты получены с использованием дистиллированной воды с ее естественным содержанием ПАВ. При условии добавления ПАВ, явление воспроизводится и с такими жидкостями, как этиленгликоль и глицерин¹¹. Очевидно, что ПАВы необходимы для создания условий, в которых может сформироваться капельный кластер, однако, вопрос ограничивается ли роль ПАВ функцией подавления ТК конвекции, или же их действие сложнее требует дальнейших исследований.

¹⁰ Для удобства сравнения на рис. 19а приведена лишь половина изображения температурного поля, для которого ось z является осью симметрии.

¹¹ Так же, как и вода, это жидкости с высоким поверхностным натяжением: глицерин порядка 70 мН/м, этиленгликоль – 50 мН/м.

Вертикальный градиент температуры в окружающей капельный кластер газовой среде достигает нескольких десятков К/мм, рис. 19б. Это означает, что при достаточно интенсивном теплообмене между поверхностью капли и окружающей средой, разница температур на нижнем, T_{db} , и верхнем, T_{dt} , участках поверхности капли может достигать нескольких Кельвинов.

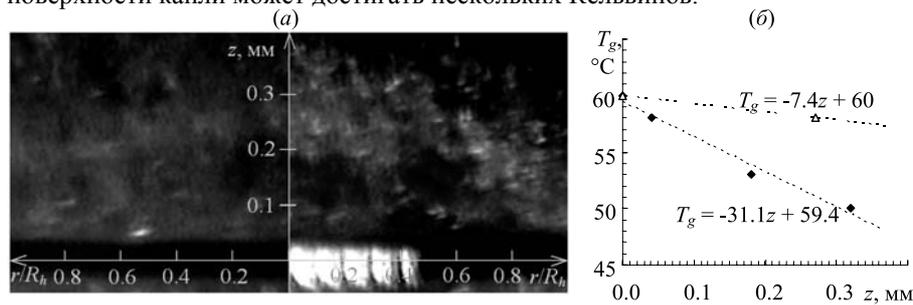


Рис. 19. (а) Поле температур в газовой среде над однородно (левая половина) и локально нагретой (правая половина) жидкой поверхностью (ось z проведена из центра нагревателя); (б) График зависимости температуры от расстояния до поверхности жидкости.

Для оценки коэффициента теплообмена, α , воспользуемся формулой¹², которая применима при обтекании дисперсных частиц потоком с числами Рейнольдса Re от 1 до 70000 в широком диапазоне чисел Прандтля Pr :

$$Nu \approx 2 + 0.46Re^{0.55}Pr^{0.33}. \quad (6)$$

В нашем случае число $Re = \rho_g U d / \mu_g \approx 4$, где $\rho_g \approx 1.3 \text{ кг/м}^3$ и $\mu_g \approx 20 \cdot 10^{-6} \text{ Па}\cdot\text{с}$ – плотность и вязкость влажного воздуха, $d \approx 0.1 \text{ мм}$ – характерный диаметр капли, $U \approx 0.5 \text{ м/с}$ – скорость, обтекающего кластер, потока. Для воздуха число $Pr = 0.71$, отсюда, по формуле (6) число $Nu \approx 3$. Это соответствует коэффициенту теплообмена

$$\alpha = Nu \cdot \lambda_g / d \approx 2 \cdot 10^3 \text{ Вт/м}^2\cdot\text{К}, \quad (7)$$

при котором разность между температурой газовой среды и поверхности капли можно пренебречь.

Тепловизор Titanium 570M может регистрировать ИК изображения с размером пикселя $15 \times 15 \text{ мкм}$. Этого достаточно для построения распределения температуры поверхности крупных капель, рис. 20.

Наиболее горячий – нижний участок поверхности капли находится в непосредственной близости от слоя жидкости, чья температура T_s известна. Отсюда, можно оценить вертикальный градиент температуры в капле:

$$\text{grad } T_{dz} = (T_{db} - T_{dt})/d \approx (T_s - T_{dt})/d. \quad (8)$$

¹² Нигматулин Р.И. Динамика многофазных сред. Ч.1. – М.: Наука, 1987. – С. 175.

Для показанного на рис. 20 кластера, разница температур T_{dt} и T_s составляет 4.6 К, что, с учетом размера капли ($d = 120 \pm 15$ мкм), эквивалентно $\text{grad } T_{dz} \approx 39 \pm 5$ К/мм. Такое значение хорошо согласуется с результатами опытов с термочромной пленкой, рис. 19, в ходе которых при более низкой температуре слоя ($T_s = 60$ °С) был зарегистрирован $\text{grad } T_{gz}$ порядка 30 К/мм.

В этом случае Число Марангони Ma для капли имеет значение

$$Ma = d \Delta \sigma / \mu a = d (\sigma'_T \Delta T) / \mu a = d (\sigma'_T (T_s - T_{dt})) / \mu a \approx 350, \quad (9)$$

где ($\mu = 10^{-3}$ Па·с, $a = 1.6 \cdot 10^{-7}$ м²/с, $\sigma'_T = 0.145$ мН/м – вязкость, температуропроводность и температурный коэффициент поверхностного натяжения воды). При таком высоком значении числа Ma в капле неизбежно возникнут интенсивные течения термокапиллярной природы, которые, учитывая симметрию поля температур, также должны быть осесимметричными, рис. 21, (течение показано схематично).

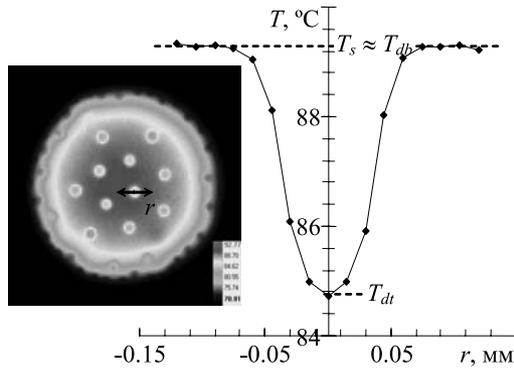


Рис. 20. Распределение температуры на поверхности капли.

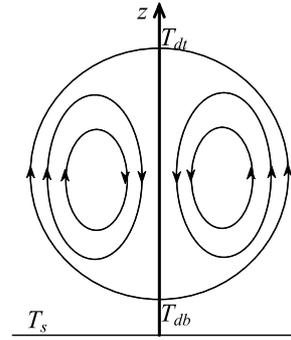


Рис. 21. ТК вихрь в капле кластера.

Если поддерживаются необходимые условия, капельный кластер может существовать неограниченно долго, при этом, периодически происходит смена поколений капель, обусловленная эффектом «исчезновения» кластера. Детали этого эффекта удастся наблюдать при частоте записи не менее 1000 кадров в секунду, рис. 22. На серии последовательных кадров видно, как в результате коалесценции единственной капли за тысячные доли секунды разрушается весь кластер. В данном случае скорость фронта разрушения кластера составляет порядка 70 см/с, что является типичным значением для скорости капиллярной волны на поверхности тонкого слоя воды. Характерные следы, остающиеся после разрушения кластера, свидетельствуют о том, что капли коалесцируют со слоем.

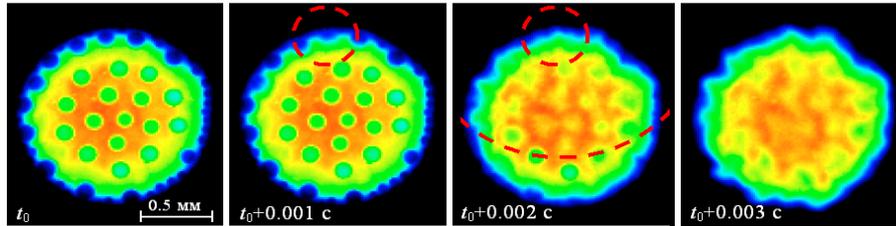
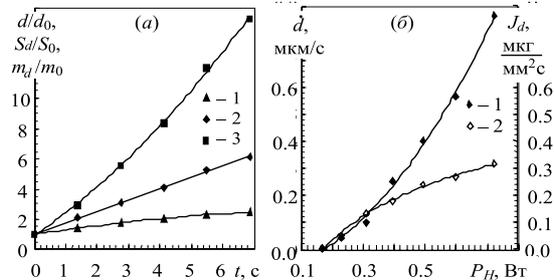


Рис. 22. Эффект исчезновения капельного кластера.

Находясь в кластере, капли постепенно увеличиваются в размере за счет конденсации пара. Во всем исследованном диапазоне мощности нагревателя наблюдалась линейная зависимость площади поверхности растущей капли от времени, рис. 23а, что свидетельствует о диффузионном режиме конденсации.

Скорость роста капель, при прочих равных условиях, прямо пропорциональна мощности нагревателя, рис. 23б: чем выше мощность, тем больше перепад температуры между поверхностью жидкости и окружающим газом и тем активнее протекает процесс конденсации пара. При увеличении мощности в 4.4 раза скорость роста диаметра капли возрастает примерно в 170 раз, массовая плотность потока пара – в 120 раз. Если при низкой мощности нагревателя капельный кластер практически в неизменном виде может существовать в течение многих минут, то с повышением мощности диаметр капли удваивается за несколько десятков секунд. В этом случае описанный выше эффект исчезновения кластера приобретает выраженную периодичность: достигнув некоторой критической массы капля неизбежно коалесцирует со слоем.

Рис. 23. (а) Изменение в процессе роста капли ее диаметра 1, площади поверхности 2 и массы 3. Мощность нагревателя 0.6 Вт. При нормировке использованы параметры капли в момент начала измерения; (б) График зависимостей от мощности нагревателя скорости роста капли 1 и плотности потока пара 2, конденсирующегося на ее поверхности.



Капельный кластер формируется при условии, что градиент температуры над неоднородно нагретой поверхностью жидкости превышает некоторый пороговый уровень. Кластер обеспечивает дополнительный механизм рассеяния энергии, то есть является типичной диссипативной структурой.

Термокапиллярное напряжение, действующее на единицу площади поверхности капли, равно $\nabla\sigma$, работа поверхностных сил (в единицу времени)

равна $A = \oint (v \nabla \sigma) dS$, где v – скорость жидкости на поверхности капли. При этом, согласно второму началу термодинамики, $A \leq q \delta T / T$, где q – поток тепла, переносимый с нижней поверхности капли термокапиллярным потоком.

Движение несжимаемой ($\nabla v = 0$) Ньютоновской жидкости внутри капли подчиняется уравнению Навье-Стокса

$$\rho \frac{dv}{dt} = -\nabla p + \mu \Delta v, \quad (10)$$

где μ – коэффициент вязкости. Для кинетической энергии всей жидкости внутри капли получим уравнение баланса

$$\frac{d}{dt} \int \frac{\rho v^2}{2} d^3x = -\oint v_n p dS + \mu \int v \Delta v d^3x. \quad (11)$$

С учетом тождества

$$\begin{aligned} (v \Delta v) &= \sum_x (\nabla(v_x \nabla v_x)) - \sum_x (\nabla v_x)^2 = 1/2 \Delta(v)^2 - \sum_x (\nabla v_x)^2 : \\ \int (v \Delta v) d^3x &= \frac{1}{2} \oint \frac{\partial(v)^2}{\partial n} dS - \int \sum_x (\nabla v_x)^2 d^3x, \end{aligned} \quad (12)$$

первый член определяет перенос, второй – поглощение кинетической энергии, причем поток энергии, поступающий с поверхности, равен работе термокапиллярных сил, и стационарное или квазистационарное распределение температуры обеспечивается тороидальным движением жидкости внутри капли, рис. 21, которое дает дополнительный механизм рассеяния энергии.

В случае стационарного (или квазистационарного) режима

$$\frac{d}{dt} \int \frac{\rho v^2}{2} d^3x = 0, \quad \oint v_n p dS = 0, \quad (13)$$

и компенсация потерь кинетической энергии жидкости работой термокапиллярных сил выражается соотношением:

$$\mu \int \sum_x (\nabla v_x)^2 d^3x = \frac{\mu}{2} \oint \frac{\partial(v)^2}{\partial n} dS = A = \oint (v \nabla \sigma) dS. \quad (14)$$

За счет вязкого трения кинетическая энергия жидкости преобразуется в тепловую и рассеивается вместе с переносимым тепловым потоком.

Соотношение (14) позволяет оценить порядок величины скорости жидкости и переносимый поток энергии. Размер капли определяется ее радиусом r_d . Градиент поверхностного натяжения имеет порядок $\delta\sigma/r_d$, градиент скорости имеет порядок v/r_d , поверхность капли $\sim r_d^2$. В итоге получим

$$v \approx \delta\sigma/\mu, \quad A \approx (\delta\sigma)^2 r_d / \mu, \quad (15)$$

переносимый тепловой поток равен

$$q \approx T(\delta\sigma)^2 r_d / \mu \delta T = \frac{r_d T}{\mu} \left(\frac{d\sigma}{dT} \right)^2 \delta T. \quad (16)$$

Используя соотношение (15) и (16), можно оценить (по порядку величины) скорость течений на поверхности капли, работу поверхностных сил в единицу времени и переносимый ими тепловой поток.

$$v \approx \delta\sigma / \mu = \frac{\sigma'_T \text{grad} T_z d}{\mu}, \quad (17)$$

$$A \approx \delta\sigma^2 r_d / \mu = (\sigma'_T \text{grad} T_z 2r)^2 r_d / \mu \quad (18)$$

$$q \approx T \delta\sigma^2 r_d / \mu \delta T = T_0 (\sigma'_T \text{grad} T_z 2r_d)^2 r_d / \mu \text{grad} T_z 2r_d = T_0 \sigma'^2_T \text{grad} T_z 2r_d^2 / \mu \quad (19)$$

где σ'_T – температурный коэффициент поверхностного натяжения воды. Подстановка численных значений: $\sigma'_T = 0.145$ мН/м·К, $T_0 = 330$ К, $\mu \approx 0.5$ мН·с/м² (учтено, что температура капли порядка 60 °С), $r_d = 30$ мкм, $\text{grad} T_z \approx 30$ К/мм, дает

$$v \approx 0.5 \text{ м/с}, A \approx 4 \cdot 10^{-9} \text{ Дж}, q \approx 0.8 \cdot 10^{-6} \text{ Вт}. \quad (20)$$

Прямое измерение скорости течений на поверхности капель (например, за счет внедрения в них трассерных частиц), а тем более, измерение оцененных энергетических параметров, является сложной, и, возможно, технически нереализуемой задачей. Однако, в пользу существования термокапиллярных течений, создающих дополнительный механизм рассеяния энергии, свидетельствует следующий экспериментальный факт: в момент разрушения кластера наблюдается скачок температуры поверхности слоя, рис. 24. График построен с использованием следующего алгоритма: в пределах каждого из четырех квадратных участков определяется максимум температуры и вычисляется среднее значение температурных максимумов.

По мере восстановления капельного кластера температура поверхности возвращается к исходному уровню. Течения в каплях кластера интенсифицируют теплообмен лишь в тонком слое (порядка диаметра капли), непосредственно прилегающем к жидкой поверхности. Их влияние на теплообмен в целом относительно невелико, поэтому, зафиксированные скачки температуры не превышали 0.15 К.

Локальный источник тепла, необходимый для существования капельного кластера, порождает восходящий паро-воздушный поток. На рис. 25 показаны примеры визуализации структуры этого потока вблизи жидкой поверхности. Изображения получены при горизонтальном положении микроскопа, поток подсвечен плоским лазерным лучом, направленным параллельно жидкой по-

верхности. Количество микрокапель, рассеивающих излучение лазера, искусственно повышено за счет задымления.

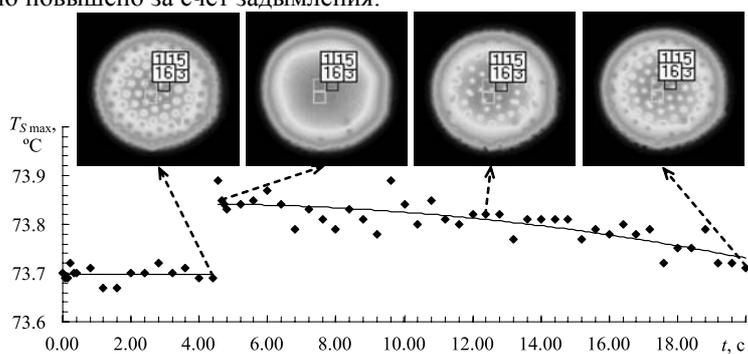


Рис. 24. Скачок температуры поверхности слоя при разрушении капельного кластера.

При анализе структуры течений обращает на себя внимание существование над нагревателем слабо расходящейся паровоздушной струи, бьющей вертикально вверх от жидкой поверхности, рис. 25а. Эта струя состоит преимущественно из пара и заметно ограничивает проникновение воздуха в область капельного кластера. Фактически, кластер находится в атмосфере насыщенного пара, что объясняет описанный ранее эффект непрерывного роста капель.

Макромасштабные (на фоне рассматриваемого процесса) воздушные течения приводят к характерной деформации паровоздушного потока, при этом, на границе нагревателя формируется вихрь в виде незамкнутого участка тора, рис. 25б.

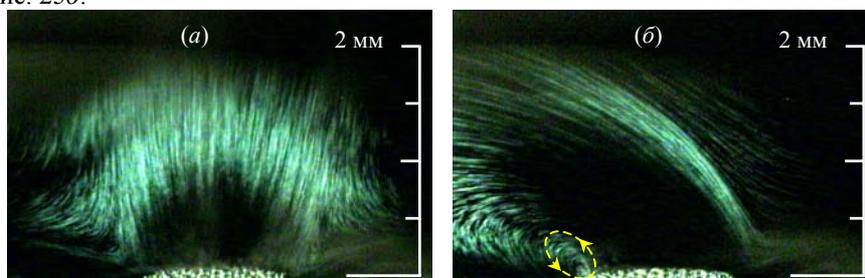


Рис. 25. Структура паровоздушного потока в вертикальной плоскости, проходящей через центр нагревателя: (а) Невозмущенный восходящий поток; (б) Деформация потока под действием макромасштабного течения (дополнительно показано направление вращения вихря).

Благодаря тороидальному вихрю реализуются условия, необходимые для проявления «тандем-эффектов» первого и второго типа, играющих важную роль для понимания механизма левитации капельного кластера над жидкой

поверхностью. Объединение капель в тандемы первого типа, рис. 26а, происходит в самом тороидальном вихре – между каплями, которые, сблизившись, начинают вращаться вокруг общей оси. Возникающая сила притяжения аэродинамической природы сохраняется в течении 5...10 секунд, после проникновения тандема в область кластера. Затем, тандем распадается на две независимые капли. Тандемы второго типа образуются, когда выброшенная тороидальным вихрем капля падает сверху на уже сформировавшийся кластер и «оседлывает» одну из капель, рис. 26б. Период существования тандемов второго типа также не превышает нескольких секунд.

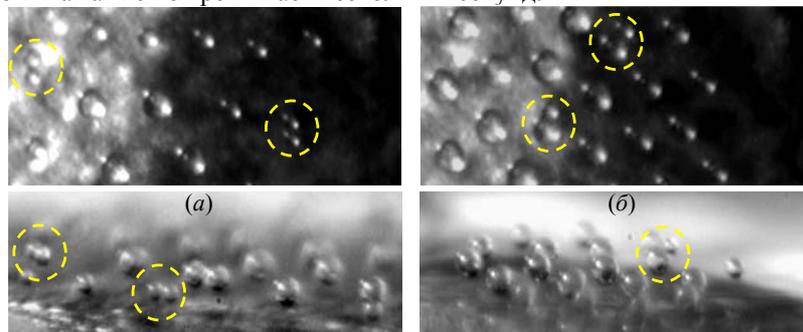


Рис. 26. Тандем-эффект первого (а) и второго (б) типов (вид сверху и сбоку).

В числе теоретически возможных причин левитации капель рассматривались: а) электризация капель и поверхности жидкости, б) термокапиллярные течения на поверхности капель, в) подъемная сила в восходящем конвективном потоке воздуха (Стоксовский механизм).

В дальнейшем, первые два механизма были исключены из рассмотрения, как противоречащие экспериментальным данным. В частности, на кластер не влияет заземление кюветы и электростатические поля напряженностью до 60 кВ/м, но главное, электрическими силами невозможно объяснить тандем-эффекты. Распределение температуры на капле, рис. 20, индуцирует термокапиллярные течения, способные создать под каплей лишь область пониженного давления, но не наоборот.

В пользу Стоксовского механизма левитации кластера свидетельствует существование мощного парогазового потока над нагревателем, рис. 25. Чтобы капля зависла в потоке со скоростью течения U , должно выполняться соотношение:

$$m_d g = C_d S_d \rho_v U^2 / 2, \quad (21)$$

где $m_d = \rho_l \pi d^3 / 6$, ρ_v – плотность насыщенного пара температуре испаряющейся жидкости, $S_d = \pi d^2 / 4$ – площадь сечения капли, C_d – коэффициент сопротивления, зависящий от числа Рейнольдса $Re = Ud\rho_v/\mu$. В данном случае

число Re близко к единице и $C_d = 24/Re$, поэтому зависимость максимального диаметра d_{max} левитирующей капли определяется выражением:

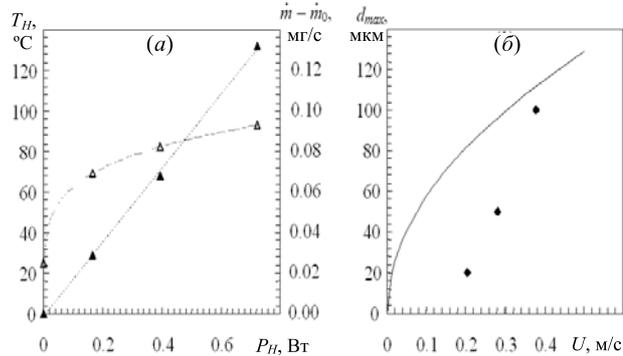
$$d_{max}(U) = (18 \mu U / \rho_l g)^{1/2}. \quad (22)$$

Прямое измерение скорости потока технически сложная задача, поэтому был реализован косвенный метод измерения U по скорости, \dot{m} , изменения веса жидкости во время генерации капельного кластера. Действительно, зная температуру жидкости, площадь, S_H , нагретого участка поверхности и скорость испарения слоя, \dot{m}_0 , при выключенном нагревателе, несложно оценить скорость потока пара над нагревателем. Плотность потока пара $J_v = (\dot{m} - \dot{m}_0) / S_H$ кг/м²с. Отсюда:

$$U = J_v / \rho_v = (\dot{m} - \dot{m}_0) / \rho_v S_H. \quad (23)$$

Необходимые для оценки U экспериментальные данные приведены на рис. 27а. Судить о диаметре капель, способных висеть в потоке при различных значениях U , можно по расчетной зависимости, представленной на рис. 27б. Здесь же приведены результаты измерения максимального размера капель кластера. Положение экспериментальных точек подтверждает, что во всем исследованном диапазоне мощности нагревателя скорость парогазового потока достаточна для реализации Стоксовского механизма левитации капель.

Рис. 27. (а) График зависимостей температуры нагревателя (светлые маркеры) и скорости испарения слоя (темные маркеры) от подводимой электрической мощности; (б) Зависимость максимального диаметра капли, способной левитировать над слоем, от скорости паровоздушного потока. Сплошная линия соответствует зависимости (22), точки – экспериментальным данным.



Эксперименты, в ходе которых фиксировалось положение капель разного размера над жидкой поверхностью, рис. 28а, дают представление о вертикальном распределении скорости течений в парогазовой струе. Поскольку диаметр, а значит, и масса капель известны, скорость потока может быть определена из равенства веса капли силе Стокса, рис. 28б.

Как видно из графика, зависимость распадается на два участка, один из которых (темные маркеры) соответствует небольшим каплям, второй (светлые

маркеры) – более крупным. Экстраполяция по первому участку в область малых расстояний дает вполне ожидаемые значения U , в отличие от второго участка, из которого следует, что вблизи жидкой поверхности скорость потока становится нефизично высокой. График на рис. 28*в* отражает трансформацию зависимости рис. 28*б* с учетом поправки на диаметр капель. Фактически, изменение хода зависимости происходит, когда расстояние между каплями и слоем становится меньше, чем радиус капли. В этом случае механизм обтекания капли существенно усложняется, и применение формулы Стокса становится некорректным. Несмотря на это, описанные результаты имеют принципиальное значение – эффект резкого замедления потока объясняет стабильность положения капельного кластера. Характеристики парогазовой струи свидетельствуют, что основной причиной ее возникновения является резкое охлаждение, и как следствие – конденсация пара в газовой среде вблизи жидкой поверхности.

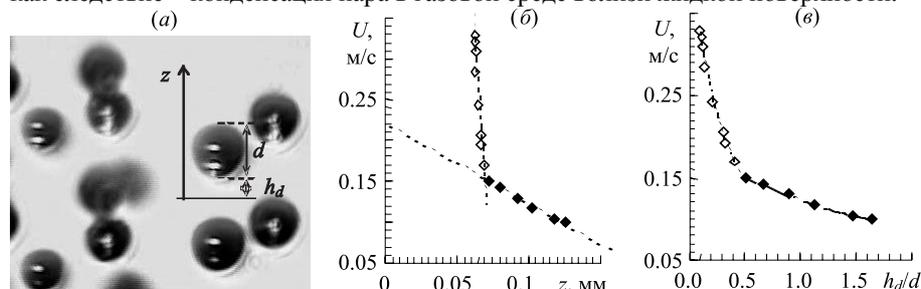


Рис. 28. (а) Положение капель кластера над жидкой поверхностью; (б) Зависимость скорости потока (вычисленная по диаметру капли) от расстояния от жидкой поверхности; (в) Трансформация зависимости (б) с учетом поправки на диаметр капель.

Отличительной чертой капельного кластера является упорядоченная гексагональная структура, для характеристики которой введем расстояние L_{cl} между центрами капель, рис. 29, и коэффициент $K_{cl} = S_{cl}/7S_d$, где S_{cl} – минимальная площадь круга, в который может вписаться одна гексагональная ячейка, S_d – площадь поперечного сечения капли. Наблюдения показывают, что при прочих равных условиях, чем выше мощность нагревателя, тем больше расстояние между каплями кластера. График на рис. 29*а* иллюстрирует трансформацию кластера по мере роста капель. Вне зависимости от мощности нагревателя, по мере увеличения диаметра капель, расстояние L_{cl} изменяется незначительно, в результате чего плотность упаковки кластера, характеризуемая коэф. K_{cl} , возрастает в несколько раз. Впрочем, предельное значение $L_{cl} = 1.5$, соответствующее нулевому расстоянию между каплями, не достигалось ни в одном из экспериментов.

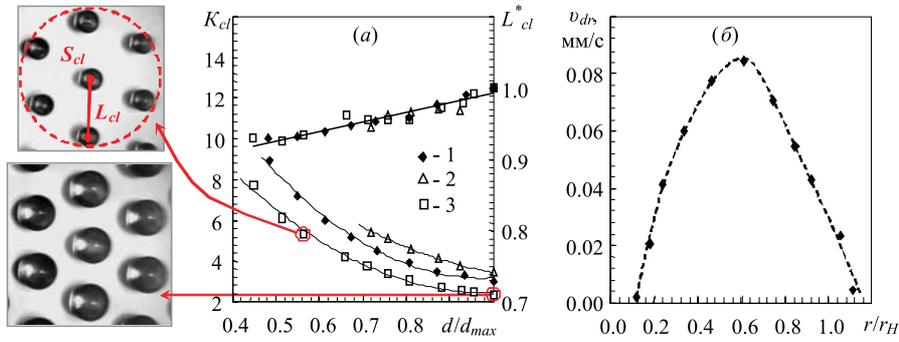


Рис. 29. (а) График зависимостей от диаметра капль коэф. K_{cl} (нижняя группа) и расстояния $L_{cl}^* = L_{cl}/L_{cl\ max}$. Кривые 1, 2, 3 соответствуют мощности нагревателя 0.39, 0.49 и 0.72 Вт; (б) Зависимость скорости перемещения капли от расстояния до центра нагревателя.

Устойчивая гексагональная структура кластера свидетельствует о том, что в горизонтальной плоскости действуют взаимно компенсирующиеся силы сближения и отталкивания капль. В отсутствии кластера одиночная капля медленно дрейфует к центру нагревателя, при этом, скорость дрейфа сначала возрастает, достигая максимума примерно на половине расстояния от края до центра нагревателя, а затем снижается до нуля, не достигнув центра, рис. 29б.

Основной причиной такого движения капли является радиальный градиент давления, $\text{grad } P_r$, возникающий из-за неоднородного нагрева жидкой поверхности: в центре, жидкость испаряется интенсивней, соответственно скорость паровоздушного потока выше, а давление ниже. Центростремительная сила F_c , учитывая малую скорость движения капли, может быть приравнена силе Стокса:

$$F_c = |\text{grad } P_r| V_d = 12\pi\mu_g d v_{dr}, \quad (24)$$

где $V_d = 32 \pi d^3/3$ – объем капли, $\mu_g = 18.5 \cdot 10^{-6}$ Па·с – вязкость влажного воздуха.

При скорости 0.3 м/с, характерной для парогазового потока, локальное понижение давления $\Delta P = \rho U^2/2$ составляет порядка 50 Па. Согласно же данным о скорости движения капли, рис. 29б, радиальный градиент давления в области кластера не превышает 16 Па/мм. В этом случае на каплю действует сила величиной до 2 нН (на порядок меньше веса капли), которая при сближении капль уравнивается некоторой короткодействующей силой отталкивания.

При обтекании капль кластера доминирующими являются вязкостные эффекты. С этой точки зрения, возникновение аэродинамических сил отталкивания капль выглядит вполне закономерным¹³. Для сил такой природы харак-

¹³ Хаппель Дж., Бреннер Г. Гидродинамика при малых числах Рейнольдса. – М.: Мир, 1976. – 630 с.

терен небольшой (сопоставимый с размерами объекта, создающего возмущение потока) радиус действия и жесткая привязка к источнику возмущений – в данном случае к каплям кластера. На расстояниях порядка диаметра капли изменения паровоздушного потока вдоль жидкой поверхности незначительны, что объясняет радиальную симметрию (относительно оси капли) поля сил отталкивания.

Аэродинамическая задача обтекания кластера паровоздушным потоком (трехмерная модель из семи сфер, образующих гексагональную структуру) была решена с применением программы ANSYS-CFX. Расчеты базировались на решении уравнения Навье-Стокса с учетом известных из эксперимента параметров потока. Результаты моделирования подтвердили предположение о существовании между каплями областей повышенного давления, рис. 30, достаточно выраженных, для возникновения сил отталкивания величиной порядка нескольких нН. Такие силы отталкивания, фактически, равны действующим в кластере центробежным силам. Согласно расчетам, при прочих равных условиях, сближение капель вызывает повышение давления в пространстве между каплями, не оказывая влияния на центробежные силы. Это объясняет механизм стабилизации положения капель в горизонтальной плоскости, а также природу гексагональной структуры кластера.

По многим характеристикам капельный кластер является уникальным природным объектом, заслуживающим пристального внимания с точки зрения практических приложений. Кратко остановимся на трех областях применения нового явления, в рамках которых автором получены патенты на изобретения.

Дозирование сверхмалых объемов жидкостей. В этом случае капельный кластер используется в качестве источника неограниченного количества микродоз жидкости, счетное число которых всасывается в микрокапилляр потоком воздуха. Кластер дает уникальную возможность управления объемом дозы жидкости, с шагом порядка нескольких пиколитров, простым изменением температуры жидкости.

Контроль содержания аэрозольных частиц в воздухе. Зарождение микрокапель над испаряющейся жидкой поверхностью происходит в центрах конденсации, основными из которых являются аэрозольные частицы. Метод реализован в опытном образце пылемера, принцип работы которого основан на измерении скорости увеличения площади капельного кластера по интенсивно-

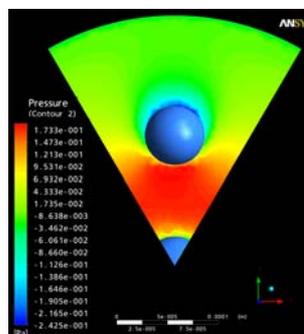


Рис. 30. Распределение давления в горизонтальном сечении, проходящем через центр капель.

сти рассеиваемого им лазерного излучения. Благодаря эффекту «превращения» субмикронных частиц, выступающих ядрами конденсации пара, в относительно крупные и легко регистрируемые капли кластера, данное направление представляет интерес для технологий чистых производственных помещений. В частности, может использоваться при разработке нового типа приборов, регистрирующих счетные концентрации сверхмалых (< 0.1 мкм) аэрозольных частиц.

Визуализация течений на межфазной поверхности жидкость-газ. Капли кластера могут использоваться как трассирующие частицы, локализованные в принципиально важном для математического моделирования слое вблизи межфазной поверхности жидкость-газ. Они способны детально визуализировать микромасштабные поля скоростей, рис. 31, проявляя свойства миниатюрных датчиков, своим размером сигнализирующих о ряде параметров газовой среды.

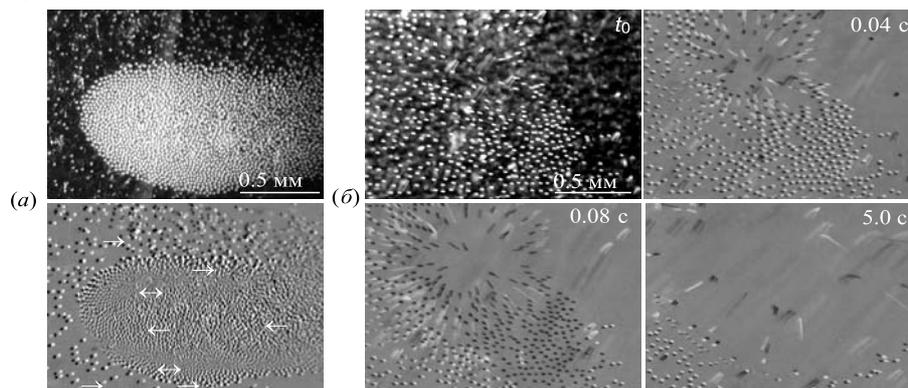


Рис. 31. Примеры визуализации течений на межфазной границе жидкость-газ. Применено наложение негативного и позитивного изображений последовательных кадров видеозаписи: (а) Тепловая конвекция воздуха внутри цилиндра Стефана; (б) Зарождение и развитие термокапиллярного вихря в тонком слое воды с ПАВ. Граница вихря после стабилизации процесса (на 5-ой секунде) очерчивается множеством малоподвижных капель.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

1. Сформулирована концепция фотеконскопии – принципиально нового метода исследования жидкостей, в котором используется эффект динамической деформации межфазной поверхности жидкость-газ термокапиллярными течениями, индуцируемыми пространственно локализованными тепловыми импульсами, а источником информации служит фотеконограмма – зависимость, отражающая изменения во времени диаметра термокапиллярного отклика.

2. Разработаны двухлучевые (с применением мощного индуцирующего и слабого зондирующего лазерных пучков) методики исследования фотоиндуцированного термокапиллярного эффекта в тонком горизонтальном слое жидкости, адаптированные для изучения эволюционных зависимостей термокапиллярного углубления и отклика, в том числе, на стадии релаксации течений. Экспериментально изучено влияние на углубление и отклик основных параметров системы «пучок/слой/подложка»: толщины жидкого слоя, коэффициента поглощения излучения жидкости, теплофизических свойств подложки, мощности индуцирующего пучка, распределения интенсивности зондирующего пучка и др.

3. На основании обобщения результатов исследований фотоиндуцированного термокапиллярного эффекта определены базовые требования к конструкции прибора, реализующего метод фотеконскопии, а также к процедуре анализа жидкостей, соблюдение которых позволяет получать хорошо воспроизводимые, высокоинформативные фотеконограммы. К таким требованиям относятся:

- применение встроенного в подложку нагревателя (отказ от способа индуцирования термокапиллярного эффекта тепловым действием лазерного пучка) и маломощного зондирующего лазерного пучка;

- герметизация и термостатирование образца жидкости во время измерения;

- контроль геометрических параметров образца (в виде тонкого горизонтального слоя) анализируемой жидкости:

- а) толщины слоя с точностью не хуже ± 50 мкм;

- б) клиновидности слоя, обусловленной негоризонтальностью подложки, с точностью не хуже ± 0.1 град;

- стабилизация мощности генерируемых нагревателем тепловых импульсов с точностью не хуже ± 0.05 % от опорного уровня;

- контроль временных параметров режима воздействия (длительности импульсов, интервалов между импульсами и т.д.) с точностью не хуже ± 1 мс.

4. Впервые осуществлена приборная реализация метода фотеконскопии – разработан и изготовлен, не имеющий мировых аналогов по физическому принципу измерений, компьютеризированный комплекс, включающий в себя многоцелевой анализатор жидкостей «Фотекон-D2» и пакет программ, выполняющих в автоматическом режиме функции регистрации фотеконограмм, обработки и хранения результатов измерений.

5. На основе фотеконскопии разработаны:

- унифицированная экспресс-методика идентификации жидкостей, сочетающая простоту процедуры измерений с возможностью достоверной идентификации образцов сложного химического состава;

- ряд специализированных методик мультипараметрического производственного контроля показателей качества сырьевых и технологических жидко-

стей, имеющих большое практическое значение: нефти, газоконденсатов, ГСМ, антифризов и др.

6. Открыто новое явление – диссипативная структура «Капельный кластер» – стабильная гексагональная структура из микрокапель конденсата (диаметром 15...150 мкм), располагающихся над локально нагретой поверхностью испаряющейся жидкости на расстоянии сопоставимом с диаметром капель.

7. Создана экспериментальная установка и разработан комплекс методик для исследования свойств капельного кластера и процессов теплопереноса, обеспечивающих формирование и устойчивое существование этой диссипативной структуры.

8. В результате комплексных экспериментальных исследований установлено:

- Явление имеет теплофизическую природу и ключевым условием для формирования капельного кластера является локальный нагрев межфазной поверхности жидкость-газ до температуры, при которой в локализованной области нагрева происходит активное испарение жидкости;

- Не выявлены эффекты, свидетельствующие о накоплении электрического заряда в каплях кластера и на межфазной поверхности жидкость-газ. В частности, на кластер не оказывает влияния наличие/отсутствие заземления слоя токопроводящей жидкости, а также электростатические поля напряженностью до 60 кВ/м;

- Для образования капельного кластера в газовой среде над активно испаряющейся жидкой поверхностью должен поддерживаться градиент температуры ($\text{grad } T_{gz}$), превышающий пороговое значение (порядка 30 К/мм). Над однородно нагретой до температуры T_s жидкой поверхностью $\text{grad } T_{gz}$ в несколько раз меньше, чем аналогичный градиент над локально нагретой поверхностью с максимальной температурой T_s , поэтому кластеры не образуются над протяженной однородно нагретой поверхностью, даже при активном испарении жидкости;

- Существует минимальная температура жидкости, ниже которой капельный кластер не формируется – выпадающие капли конденсата коалесцируют со слоем. Например, при атмосферном давлении и температуре окружающего воздуха порядка 20...25 °С, минимальная температура слоя воды, над поверхностью которого может сформироваться капельный кластер, должна быть выше 50 °С;

- В кластере происходит конденсационный рост капель, скорость которого, при прочих равных условиях, пропорциональна мощности теплового источника, генерирующего капельный кластер. Максимальный размер, достигаемый каплями, также зависит от мощности источника и ограничивается эффектом коалесценции капель;

- Коэффициент теплообмена между каплями кластера и окружающей газовой средой составляет порядка 10^3 Вт/м²·К и распределение температуры на поверхности капли определяется распределением температуры в газовой среде;

- Перепад температуры между нижним (наиболее горячим) и верхним (наиболее холодным) участками поверхности капли может достигать нескольких Кельвинов. Оценки дают значения числа Марангони порядка 350, что свидетельствует о существовании в каплях интенсивных термокапиллярных течений;

- Скорость паровоздушного потока, действующего на капли кластера, достигает значений, необходимых для того, чтобы сила Стокса компенсировала вес капли.

9. Предложена физико-математическая модель явления, которая характеризует капельный кластер, как диссипативную структуру, обеспечивающую дополнительный механизм рассеяния энергии за счет термокапиллярных течений внутри капель, а также объясняет механизмы стабилизации положения капель над жидкой поверхностью и формирования устойчивой гексагональной структуры кластера аэродинамическими эффектами, проявляющимися при обтекании капель паровоздушным потоком. Справедливость данной модели подтверждена результатами численных расчетов, выполненных с использованием программы ANSYS-CFX.

10. Объяснен ряд, сопутствующих явлению, физических эффектов:

- эффект спонтанного разрушения капельного кластера;

- эффект объединения капель в тандемы;

- эффект понижения температуры жидкой поверхности под капельным кластером.

11. На основе явления разработаны принципиально новые методы:

- микродозирования жидкостей;

- контроля концентрации аэрозольных частиц в воздухе;

- визуализации микромасштабных течений вблизи межфазной поверхности жидкость-газ.

СПИСОК ОСНОВНЫХ ПУБЛИКАЦИЙ

Статьи в изданиях, рекомендованных ВАК

1. Федорец А.А., Марчук И.В., Кабов О.А. О роли потока пара в механизме левитации диссипативной структуры капельный кластер // Письма в ЖТФ. – 2011. – № 3. – С. 45-50.
2. Аринштейн Э.А., Федорец А.А. Механизм рассеяния энергии капельным кластером // Письма в ЖЭТФ. – 2010. – № 10. – С. 726-729.
3. Кислицын А.А., Пак В.С., Федорец А.А. Аэродинамическая модель устойчивости капельного кластера // Вестник ТюмГУ. – 2009. – № 6. – С.118–124.
4. Федорец А.А., Бакин П.Ю., Колмаков Э.Э. О возможности измерения температуропроводности жидкости по фотекнограмме // Вестник ТюмГУ. – 2009. – № 6. – С.118–124.
5. Федорец А.А. О применении капельного кластера для визуализации микромасштабных течений жидкости и газа. Известия РАН. Механика жидкости и газа. – 2008. – № 6. – С.97–100.

6. Федорец А.А. О механизме некоалесценции в капельном кластере // Письма в ЖЭТФ. – 2005. – № 9. – С.551–555.
7. Федорец А.А. Капельный кластер // Письма в ЖЭТФ. – 2004. – № 8. – С.457–459.
8. Безуглый Б.А., Федорец А.А., Тарасов О.А., Иванова Н.А. Фотоиндуцированные капиллярные эффекты: новые области применения // Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования. – 2004. – № 6. – С.82–85.
9. Безуглый Б.А., Федорец А.А. Применение фотоиндуцированного термокапиллярного эффекта для измерения энергетических параметров лазерного пучка // Вестник ТюмГУ. – 2002. – № 3. – С.118–124.
10. Безуглый Б.А., Федорец А.А. Лазерный метод измерения толщины тонкого слоя жидкости на твердой поверхности с помощью термокапиллярного отклика // Письма в ЖТФ. – 2001. – № 9. – С.20–25.
11. Безуглый Б.А., Тарасов О.А., Федорец А.А. Усовершенствованный метод наклонной пластинки измерения краевого угла смачивания // Коллоидный журнал. – 2001. – № 6. – С.735–741.
12. Безуглый Б.А., Тарасов О.А., Федорец А.А. Применение термокапиллярного эффекта для усовершенствования метода наклонной пластинки измерения краевых углов смачивания // Вестник ТюмГУ. – 2000. – № 3. – С.60–64.
13. Безуглый Б.А., Тарасов О.А., Федорец А.А. Применение термокапиллярного эффекта для измерения толщины тонкого слоя жидкости // Вестник ТюмГУ. – 2000. – № 3. – С.64–67.

Научная монография

14. Кислицын А.А., Федорец А.А. Термокапиллярные и концентрационно-капиллярные течения в тонких слоях жидкости. – Тюмень: Изд-во ТюмГУ, 2008. – 176 с.

Изобретения, защищенные патентами РФ

15. С2 2383005 RU G 01 N 21/53. Измеритель запыленности воздуха / Федорец А.А. (Тюменский государственный университет). – № 2008101138/28; Заявл. 09.01.2008 // Изобретения и полезные модели. – 2010. – Бюл. № 6. – 5 с.
16. С2 2350929 RU G 01 N 21/53. Способ контроля запыленности воздуха / Федорец А.А., Колмаков Э.Э., Бакин П.Ю. (Тюменский государственный университет). – № 2006124294/28; Заявл. 06.07.2006 // Изобретения и полезные модели. – 2009. – Бюл. № 9. – 5 с.
17. С1 2341505 RU C 06 F 3/04. Способ проверки качества противопожарной пропитки спичек / Федорец А.А. (Тюменский государственный университет). – № 2007114724/12; Заявл. 18.04.2007 // Изобретения и полезные модели. – 2008. – Бюл. № 35. – 3 с.
18. С1 2333465 RU G 01 F 13/00. Способ сверхточного микродозирования растворов лекарственных препаратов и биологически-активных веществ / Федорец А.А. (Тюменский государственный университет). – № 2006146778/28; Заявл. 26.12.2006 // Изобретения и полезные модели. – 2008. – Бюл. № 25. – 3 с.
19. С2 2301415 RU G 01 N 21/55. Устройство для идентификации и контроля качества жидкостей / Федорец А.А. (Тюменский государственный университет). – № 2005124476/28; Заявл. 01.08.2005 // Изобретения и полезные модели. – 2007. – Бюл. № 17. – 3 с.

20. С2 2296954 RU G 01 F 1/704. Применение капельного кластера для визуализации структуры течений в слое газа, граничащем с жидкой поверхностью / Федорец А.А. (Тюменский государственный университет). – № 2004123031/28; Заявл. 27.07.2004 // Изобретения и полезные модели. – 2007. – Бюл. № 10. – 3 с.
21. С1 2271519 RU G 01 F 13/00. Способ сверхточного дозирования жидкостей / Федорец А.А. (Тюменский государственный университет). – № 2004123030/28; Заявл. 27.07.2004 // Изобретения и полезные модели. – 2006. – Бюл. № 7. – 3 с.
22. С1 2247968 RU G 01 N 21/00. Экспресс-метод идентификации и контроля качества жидкостей / Федорец А.А., Безуглый Б.А. (Тюменский государственный университет). – № 2003123856/28; Заявл. 29.07.2003 // Изобретения и полезные модели. – 2005. – Бюл. № 7. – 5 с.
23. С2 2256562 RU В 44 F 1/00, G 09 F 19/12. Термокапиллярный способ создания световых спецэффектов и устройство для его осуществления / Федорец А.А. (Тюменский государственный университет). – № 2003105753/28; Заявл. 27.02.2003 // Изобретения и полезные модели. – 2005. – Бюл. № 20. – 5 с.
24. С1 22115315 RU В 44 F 1/00, 7 G 02 F 1/315. Класс жидкостей для пузырьковых оптических переключателей / Безуглый Б.А., Федорец А.А. (Тюменский государственный университет). – № 2002117403/28; Заявл. 28.06.2002 // Изобретения и полезные модели. – 2003. – Бюл. № 30. – 5 с.
25. С2 2201587 RU 7 G 01 N 11/00. Бесконтактный способ измерения вязкости / Безуглый Б.А., Федорец А.А. (Тюменский государственный университет). – № 2001106544/28; Заявл. 11.03.2001 // Изобретения и полезные модели. – 2003. – Бюл. № 9. – 4 с.
26. С1 2190655 RU 7 С 09 К 5/04, F 28 D 15/02. Класс рабочих жидкостей для тепловых трубок / Безуглый Б.А., Тарасов О.А., Иванова Н.А., Федорец А.А. (Тюменский государственный университет). – № 2001101177/06; Заявл. 12.01.2001 // Изобретения и полезные модели. – 2002. – Бюл. № 28. – 3 с.
27. С1 2178155 RU G 01 J 1/00. Способ измерения мощности лазерного пучка и энергии лазерного им пульса / Безуглый Б.А., Федорец А.А. (Тюменский государственный университет). – № 2001109486/28; Заявл. 09.04.2001 // Изобретения и полезные модели. – 2002. – Бюл. № 1. – 4 с.
28. С1 2178163 RU 7 G 01 N 13/00, G 01 В 9/00. Способ измерения краевых углов смачивания с помощью наклонной пластинки, основанный на использовании эффекта индуцированной лазерным пучком термокапиллярной конвекции / Безуглый Б.А., Тарасов О.А., Федорец А.А. (Тюменский государственный университет). – № 2001107476/28; Заявл. 20.03.2001 // Изобретения и полезные модели. – 2002. – Бюл. № 1. – 6 с.
29. С1 2169049 RU 7 В 08 В 1/00, F 16 L 58/00. Способ очистки твердой поверхности от жидких загрязнений в виде пленки смачивания или капель / Безуглый Б.А., Федорец А.А. (Тюменский государственный университет). – № 2000102061/06; Заявл. 27.02.2003 // Изобретения и полезные модели. – 2001. – Бюл. № 17. – 4 с.
30. С1 2165073 RU 7 G 01 С 9/18. Способ контроля горизонтальности поверхности / Безуглый Б.А., Федорец А.А. (Тюменский государственный университет). – № 2000107137/28; Заявл. 21.03.2000 // Изобретения и полезные модели. – 2001. – Бюл. № 10. – 4 с.

31. С1 2165071 RU 7 G 44 B 11/06. Способ измерения толщины тонкого слоя прозрачной жидкости / Безуглый Б.А., Федорец А.А. (Тюменский государственный университет). – № 2000107549/28; Заявл. 27.03.2000 // Изобретения и полезные модели. – 2001. – Бюл. № 6. – 3 с.
 32. С2 2163712 RU 7 G 01 J 1/00. Способ измерения и контроля мощности лазерного излучения и устройство для его осуществления / Безуглый Б.А., Федорец А.А. (Тюменский государственный университет). – № 99111181/28; Заявл. 18.05.1999 // Изобретения и полезные модели. – 2001. – Бюл. № 6. – 4 с.
 33. С2 2161322 RU 7 G 02 B 5/10, 17/06. Зеркало-трансформатор гауссова светового пучка в пучок с заданным по радиальному закону распределением интенсивности, и способ его изготовления с параметрами контролируемые в процессе изготовления / Безуглый Б.А., Тарасов О.А., Федорец А.А. (Тюменский государственный университет). – № 99103762/28; Заявл. 23.02.1999 // Изобретения и полезные модели. – 2000. – Бюл. № 36. – 5 с.
 34. С1 2158898 RU 7 G 01 B 11/16, 9/02. Способ бесконтактного контроля плоскостности поверхности / Безуглый Б.А., Тарасов О.А., Федорец А.А. (Тюменский государственный университет). – № 99105326/28; Заявл. 11.03.1999 // Изобретения и полезные модели. – 2000. – Бюл. № 31. – 3 с.
 35. С1 2149353 RU 7 G 01 B 11/06. Способ измерения толщины тонкого слоя прозрачной жидкости / Безуглый Б.А., Тарасов О.А., Федорец А.А., Шепеленок С.В. (Тюменский государственный университет). – № 98114578/28; Заявл. 27.07.1998 // Изобретения и полезные модели. – 2000. – Бюл. № 14. – 4 с.
- Другие публикации:*
36. Федорец А.А., Марчук И.В., Кабов О.А. Механизм витания капельного кластера // XXIX Сибирский теплофизический семинар: Сб. тезисов докладов Всерос. конф., Новосибирск, 15-17 ноября 2010 г. – Новосибирск: Изд-во Института теплофизики СО РАН, 2010. – 241 с.
 37. Федорец А.А. Перспективы применения диссипативной структуры капельный кластер для визуализации микромасштабных течений на межфазной границе жидкость-газ // 3-я Всероссийская конференция с участием зарубежных ученых «Задачи со свободными границами: теория, эксперимент и приложения», 2008 – Бийск.
 38. Федорец А.А. Фотеконскопия – новый подход к проблеме экспресс-анализа жидкостей // III Евро-Азиатский форум инвестиций и инноваций Инвестпроектэкспо 2006, Конференция Технологический трансфер в Уральском регионе: Материалы. Екатеринбург, 2006.
 39. Федорец А.А. Фотеконскопия: новый экспресс-метод идентификации и контроля качества жидкостей // Международная конференция Модернизация образования в условиях глобализации: Тезисы докладов. Тюмень, 2005. – Изд-во ТюмГУ, – С.103-104.
 40. Федорец А.А., Бакин П.Ю., Буторин В.С. Фотекон-Д1 // Всероссийская выставка научно-технического творчества молодежи НТТМ-2005, М.: ОАО «ГАО ВВЦ». – 2005. – С.335–336.
 41. Fedorets A.A. Droplet cluster: new capillary phenomenon // International Marangoni Association Congress 2004. – Brussels, Belgium, July 14-17, 2004. – Université Libre de Bruxelles, Microgravity Research Center. – Abstracts, p. 20. (2004).

42. Безуглый Б.А., Федорец А.А., Зуева А.Ю., Чаппаров Ф.Х. Experimental setup for investigation of liquid surface deformed by convective flows in thin liquid layer // Тезисы международной конференции «Современные проблемы тепловой конвекции». Пермь: ПГУ, 2003. – С. 44-45.
43. Безуглый Б.А., Федорец А.А., Тарасов О.А., Иванова Н.А. Фотоиндуцированные капиллярные эффекты: новые области применения // II Российская конференция по космическому материаловедению: Тезисы докладов. Калуга: Изд-во «Манускрипт», 2003. – С. 45.
44. Безуглый Б.А., Тарасов О.А., Федорец А.А. Improved tilting-plate method for measuring contact angles // 16-я Европейская конференция по химии межфазных поверхностей: Тезисы докладов. Владимир: Изд-тво УНЦ ДО, М. 2003, – С. 81.
45. Безуглый Б.А., Федорец А.А., Чаппаров. Лазерный метод исследования профиля термокапиллярной деформации жидкой поверхности // Труды IX межотраслевого научного и методического семинара «Теплофизика, гидрогазодинамика, теплотехника». Вып. I. Тюмень: Изд-во ТюмГУ, 2002. – С. 41-46.
46. Bezuglyi B.A., Tarasov O.A., Fedorets A.A. Laser diagnostics of liquids and its layers // First Conference of the International Marangoni Association. – Giessen, Germany, 2001. – P. 116.
47. Bezuglyi B.A., Ivanova N.A., Tarasov O.A., Fedorets A.A. Photoinduced capillary effect in the momls-technologies // First Conference of the International Marangoni Association. – Giessen, Germany, 2001. – P. 116.
48. Bezuglyi B.A., Ivanova N.A., Fedorets A.A. Application of the photoinduced capillary phenomena in liquid microgravity technologies // First Conference of the International Marangoni Association. – Giessen, Germany, 2001. – P. 116.
49. Безуглый Б.А., Федорец А.А. Бесконтактный метод очистки твердой поверхности от жидких загрязнений в виде капель или пленки смачивания // Третий Международный аэрокосмический конгресс IAC'2000: Тезисы докладов. – М.: Изд-во СИП РИА, 2000. – С. 360.
50. Bezuglyi B.A., Tarasov O.A., Fedorets A.A. Application of photoinduced thermocapillary effect for the improvement of tilting plate method // International Conference of Colloid Chemistry and Physical-Chemical Mechanics: Abstracts. – Moscow, MSU, 1998. – P. 414.

Подписано в печать 03.05.2011. Тираж 100 экз.
Объем 2,0 уч.-изд. л. Формат 60x84/16. Заказ 340.

Издательство Тюменского государственного университета
625003, г. Тюмень, ул. Семакова, 10.
Тел./факс (3452) 45-56-60; 46-27-32
E-mail: izdatelstvo@utmn.ru