На правах рукописи

ТАРАСОВ Олег Александрович

БЕСКОНТАКТНАЯ ДИАГНОСТИКА ЖИДКОСТЕЙ И ИХ СЛОЕВ НА ОСНОВЕ ТЕРМОКАПИЛЛЯРНОГО ЭФФЕКТА, ИНДУЦИРОВАННОГО ПУЧКОМ ЛАЗЕРА

02.00.04 - «Физическая химия»

Автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук

Тюмень - 2004

Работа выполнена на кафедре радиофизики Тюменского государственного университета в лаборатории «Жидкостные микрогравитационные технологии»

Научный руководитель кандидат физико-математических наук, доцент
Безуглый Борис Антонович

Официальные оппоненты: доктор физико-математических наук, профессор
Кислицын Анатолий Александрович

кандидат физико-математических наук,
Крикунов Владимир Владимирович

Ведущая организация Институт физической химии РАН, г. Москва

Защита состоится 27 мая 2004 г. в 14 час. 00 мин. на заседании диссертационного совета К 212.274.04 в Тюменском государственном университете по адресу: 625003, г. Тюмень, ул. Перекопская 15а, ауд. 118 Физического факультета ТюмГУ.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Тюменского государственного университета.

Автореферат разослан «26» апреля 2004 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета,
кандидат химических наук,
ст. преподаватель Т. П. Котова

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. Первые работы, посвященные исследованию фотоиндуцированной термокапиллярной (ТК) конвекции, появились около четверти века тому назад, однако, в большинстве из них не были раскрыты ценные для химической технологии и физико-химических методов анализа свойства этого явления:

1) Индуцирующий пучок лазера, отраженный от деформированной ТК вихрем свободной поверхности жидкости, несет обширную информацию о протекающих конвективных процессах. Это позволяет определять ряд физико-химических характеристик жидкости, параметров ее слоя и подложки;

2) Вид получаемой информации - ТК отклик, представляющий собой интерференционную картину, которая легко поддается автоматизированной обработке;

3) Высокая чувствительность ТК отклика к характеристикам жидкости и параметрам ее слоя;

4) Возможность бесконтактного формирования конвективного вихря в замкнутом объеме, которая позволяет исследовать токсичные, агрессивные, радиоактивные, и находящиеся в экстремальных физических условиях жидкости. Достаточно обеспечить оптический доступ к слою жидкости через прозрачное окно;

Кроме того, ТК течения, вызываемые источниками света, могут проявляться в микромасштабе, поэтому этот тип конвекции перспективен для использования в микрофлуидике и комбинаторной химии.

В данной работе выяснена возможность использования ТК отклика для лазерной диагностики жидкостей. Показано, что из геометрии отклика можно извлечь информацию о таких параметрах слоя жидкости как его толщина, и кривизна свободной поверхности, что важно для нефтеперерабатывающей и лакокрасочной промышленности, а также для жидкостных космических технологий. Зависимость формы ТК отклика от величины и знака статической кривизны свободной поверхности применена для усовершенствования метода

РОС. НАЦИОНАЛЬНАЯ
БИБЛИОТЕКА
С.Петербург
09 2004 ноя 71

наклонной пластинки измерения краевого угла смачивания, который может быть использован при создании прецизионного прибора для физико-химического анализа. Предложено использовать оптические свойства ТК углубления в микро- и оптоэлектронной промышленности и в адаптивной оптике. В частности, разработано зеркало-трансформатор распределения интенсивности в пучке лазера.

Цель работы - исследование ТК конвекции, индуцированной лазерным пучком, и разработка на основе этого явления новых методов лазерной диагностики жидкостей и их слоев для физико-химического анализа в лабораториях и на производстве.

Научная новизна работы состоит в следующем:

1. Проведено комплексное исследование ТК отклика в диапазоне толщин слоя жидкости и мощности пучка, начиная с момента обнаружения деформации свободной поверхности слоя и заканчивая ТК разрывом слоя, в зависимости от физико-химических свойств жидкости.

2. Исследованы размер и форма ТК отклика в зависимости от толщины слоя и мощности индуцирующего конвекцию пучка для жидкостей различных химических классов.

3. Изучено поведение ТК отклика при наличии одномерной статической кривизны свободной поверхности жидкости, возникающей вследствие смачивания двух плоскопараллельных пластинок из разных материалов жидкостями из разных классов.

4. Доказано свойство аддитивности статической кривизны жидкого мениска и динамической кривизны ТК углубления. Продемонстрировано использование этого свойства для усовершенствования метода наклонной пластинки измерения краевого угла смачивания.

5. Впервые проанализировано поведение мениска при наклоне пластинки с различным по отношению к поверхности раздела жидкость/газ положением оси вращения пластинки при различных углах ее смачивания жидкостью.

6. Исследовано влияние подложки в виде вытянутого бруска на динамическую кривизну ТК углубления и форму ТК отклика. Показано, что это влияние можно использовать для определения вязкости жидкости.

7. Изучены оптические свойства центральной части ТК углубления в случаях плоскопараллельного слоя жидкости, одномерного статического мениска жидкости, слоя жидкости на подложке-бруске, а также круглого и эллиптичного сечения индуцирующего пучка.

По существу, разработан новый подход к лазерной диагностике жидкости, основанный на ее поверхностных свойствах, в отличие от традиционной лазерной спектроскопии, где используют зависимость от температуры объемных свойств вещества, рис. 1.

Практическая ценность. Разработан способ измерения толщины тонкого слоя прозрачной жидкости и способ бесконтактного контроля плоскостности свободной поверхности жидкости. Усовершенствован метод наклонной пластинки измерения краевого угла смачивания. Оптические свойства ТК углубления применены при разработке зеркала-трансформатора гауссова светового пучка и способа его изготовления.

Достоверность полученных результатов основана на тщательной разработке методик экспериментов, и подтверждается их сравнением с данными, полученными другими способами.

На защиту выносятся:

1. Результаты экспериментального исследования явления ТК конвекции, индуцированной тепловым действием лазерного излучения.

2. Новые способы диагностики жидкости и их слоев:

- измерение толщины тонкого слоя прозрачной жидкости,
- контроль плоскостности свободной поверхности жидкости,
- измерение краевого угла смачивания.

Апробация работы и публикации. Результаты исследований обсуждались на научных семинарах лаборатории "Жидкостные микрогравитационные технологии"; доложены на Втором Международном аэрокосмическом

конгрессе, Москва, август-сентябрь 1997; Международной конференции по коллоидной химии и физико-химической механике, Москва, октябрь 1998; Международной конференции "Передовые технологии на пороге XXI века" Москва, октябрь 1998; Первой конференции Международной ассоциации Марангони, Гиссен, Германия, октябрь 2001; XII Международной конференции "Поверхностные силы", Звенигород, июнь-июль 2002; XVI Международной конференции "Химия на межфазных поверхностях", Владимир, май 2003; опубликованы в работах, и явились основой изобретений, защищенных патентами РФ.

Публикации. По теме диссертации опубликовано 23 работы, из них - 4 статьи **в** академических журналах и 4 патента РФ.

Структура работы Диссертация состоит из введения, пяти глав, двух приложений, заключения и списка литературы. Полный объем работы 197 стр., включая 96 рис. и 12 табл. Библиография содержит 219 наименований.

КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении рассмотрено современное состояние исследований **в** области фотоиндуцированной капиллярной конвекции, обоснована актуальность темы, сформулирована цель работы, кратко изложено ее содержание.

Первая глава содержит феноменологическое описание и физические основы явления ТК конвекции, вызванной тепловым действием лазерного излучения. Приведен критический обзор теоретических и экспериментальных работ по ТК конвекции. Составлена классификация основных фототермических методов диагностики текучих сред и указано место нового подхода, развиваемого в данной работе, рис. 1.

Во **второй главе** представлены результаты экспериментального исследования оптических свойств ТК углубления **в** зависимости от мощности индуцирующего пучка и толщины слоя жидкости. Изучено поведение тонких слоев при их ТК разрыве, и толстых слоев, в которых ТК течение практически не деформирует свободную поверхность жидкости. Полученные результаты

Рис. 1. Классификация основных фототермических эффектов и основанные на них методы лазерной диагностики.

использованы для разработки нового способа измерения толщины тонкого оптически прозрачного слоя жидкости.

Схема установки показана на рис. 2. Здесь 1 He-Ne лазер ЛГ-111 (λ = 633 нм), 2 светофильтр, 3 и 4 зеркала, 5 и 6 экраны W_1 и W_2, 7 чашка Петри с внутренним диаметром 104 мм, 8 подложка (эбонитовая диаметром 55 мм и высотой 6 мм, или карболитовая 40x40x4 мм^3), 9 слой жидкости, 10 цилиндр Стефана высотой 11 см, 11 микрометрический треножник. Оптический путь луча от выходного зеркала лазера до слоя был равен 60 см, а от жидкого слоя до экранов L_1 = 78 см и L_2 = 163 см, соответственно. Пучок лазера имел в сечении форму эллипса с диаметрами на подложке 3×3.5 мм^2. Показаны также негатив модовой структуры лазерного пучка и негатив ТК отклика.

Толщину слоя жидкости, *h,* задавали с помощью отрезка калиброванной проволочки диаметром **295 ± 5 мкм** и длиной 4 мм, отрихтованного между поверхностями фотопластинок. Проволочку помещали на подложку в точку падения пучка лазера. При перекрытом пучке наблюдали за свободной поверхностью жидкости вблизи проволочки в скользящих отраженных лучах квазиточечного источника. Поверхность была заметно искривлена, если проволочка выступала из слоя на несколько микрометров. Жидкость добавляли варипипеткой примерно по 20 мкл, и с момента, когда свободная поверхность становилась плоской, считали, что толщина слоя равна диаметру проволочки. Затем проволочку перемещали на край подложки, капая перед ней жидкость взятую из объема чашки. Описанный метод задания *h* имеет погрешность около 10 мкм, которая определяется, в основном, гистерезисом угла смачивания стенок сосуда. Для уменьшения испарения слоя под действием токов воздуха использовали цилиндр Стефана. Толщину слоя меняли добавляя или отбавляя варипипеткой известный объем жидкости. Дождавшись стационаризации отклика, измеряли его диаметр на двух экранах.

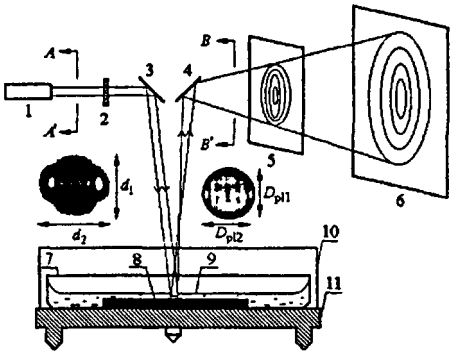

Рис. 2. Принципиальная схема установки,

Зависимость диаметра отклика от толщины слоя жидкости

С толщиной слоя диаметр отклика уменьшается, что объясняется следующим образом, рис. 3. При увеличении *h* градиент *T* на свободной поверхности уменьшается, рис. 3 *а.* Это вызывает падение скорости, $\dot{\upsilon}$, ТК течения и, следовательно, увеличение радиуса кривизны, *R,* профиля свободной поверхности, рис. 3 *б.* Фокусное расстояние, f, ТК зеркала увеличивается, что и приводит уменьшению диаметра, *D,* отклика, рис. 3 *в.*

Расчет фокусного расстояния ТК углубления

На рис. 4 *а* показаны зависимости $f(h)$, для трех значений мощности пучка. Зависимости для $P = 3.4$ мВт хорошо аппроксимируются прямой, а для $P = 7.6$ и 16.6 мВт - параболой. Различие между значениями f для кривых с одинаковой P, но вычисленных разными методами составляет в среднем 15 %.

Рассчитанные по данным эксперимента значения f дали совпадение с точностью 2 см с результатами их непосредственного определения, когда экран помещали в фокус отраженного от слоя пучка. Зависимости $f(P)$ хорошо аппроксимируются функциями вида P^{-a}, где $a \approx 0.8$, рис. 4 *б*. Уменьшение f с ростом P связано с увеличением температуры в области нагрева.

По полученным значениям f можно оценить максимальную скорость, υ, течения в ТК вихре, приняв центральную часть углубления сферической с радиусом кривизны R, и приравняв динамическое и лапласово давления:

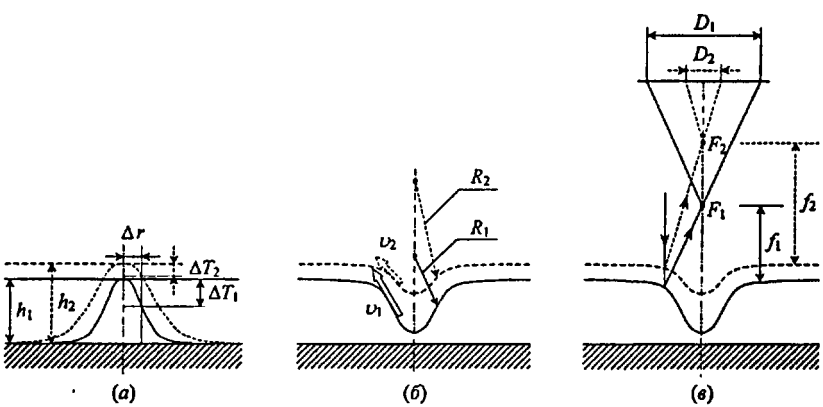

Рис. 3. Качественная иллюстрация уменьшения диаметра ТК отклика с ростом толщины жидкого слоя. (*а*) Распределение температуры на свободной поверхности для гауссова пучка. При $h_1 < h_2$ выполняется $\Delta T_1/\Delta r > \Delta T_2/\Delta r$, и, следовательно, $gradT_1 > gradT_2$. (*б*) Профиль жидкой поверхности деформированной осесимметричным ТК течением. (*в*) Оптические свойства ТК зеркала. Для наглядности, величины R преувеличены, а пропорциональность $R \approx 2F$ не соблюдается.

$$\rho\upsilon^2/2 = 2\sigma/R \approx \sigma/f \quad \text{откуда} \quad \upsilon \approx (2\sigma/\rho f)^{1/2} \qquad (1\text{-}2)$$

С учетом (2), приняв зависимость $f(h)$ линейной, и допустив $a = 1$, получим

$$\upsilon^2 \sim 1/f \sim 1/h \quad \text{и} \quad \upsilon^2 \sim 1/f \sim P \qquad \textbf{(3-4)}$$

Соотношения (3-4) качественно согласуются с данными А. Бенара[1], который

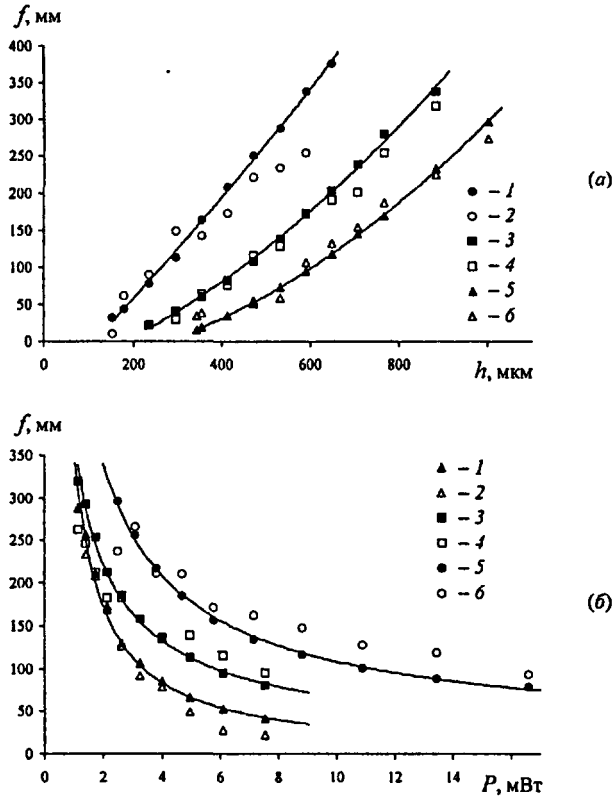

Рис. 4. Зависимость фокусного расстояния ТК зеркала в случае слоя бензилового спирта на эбонитовой подложке-пластине: (а) от толщины слоя для различных мощностей пучка: 1, 2 – P = 3.4 мВт; 3, 4 – 7.6 мВт; 5, 6 – 16.6 мВт; (б) от мощности индуцирующего пучка для слоев различной толщины: 1, 2 – h = 295 мкм; 3, 4 – 415 мкм; 5, 6 – 530 мкм. Четные кривые соответствуют расчету f по диаметрам отклика на двух экранах, а нечетные – по диаметру пучка на слое и диаметру отклика на дальнем экране.

---

[1] Benard H. // Ann. Chem. Phys. Ser., 7. – 1901. – Vol. 23. – No 62.

показал, что разница высоты поверхности в пределах гексагональной ячейки прямо пропорциональна перепаду температур между дном сосуда и свободной поверхностью и обратно пропорциональна толщине слоя. Соотношение (4) показывает, что в исследованном диапазоне вязкостей кинетическая энергия ТК течения растет прямо пропорционально мощности пучка. Другими словами, КПД преобразования световой энергии в кинетическую энергию ТК течения остается постоянным в исследованном диапазоне мощностей пучка.

Метод измерения толщины оптически прозрачного слоя жидкости

Поскольку вызванная пучком лазера ТК конвекция наблюдается в слоях жидкостей тоньше нескольких мм, а диаметр ТК отклика очень чувствителен к изменению толщины слоя, то это наводит на мысль использовать отклик для бесконтактного контроля толщин тонких жидких слоев. Для заданной системы жидкость/подложка можно построить зависимость $D(h)$, и затем использовать ее как калибровочную.

Для определения разрешающей способности нового метода была рассчитана зависимость отношения $\Delta D/\Delta h$, где ΔD - приращение диаметра отклика, отвечающее приращению толщины слоя Δh, рис. 5 а. В слоях близких к ТК разрыву $\Delta D/\Delta h$ достигает 4.6 мм/мкм, а в середине диапазона измерений

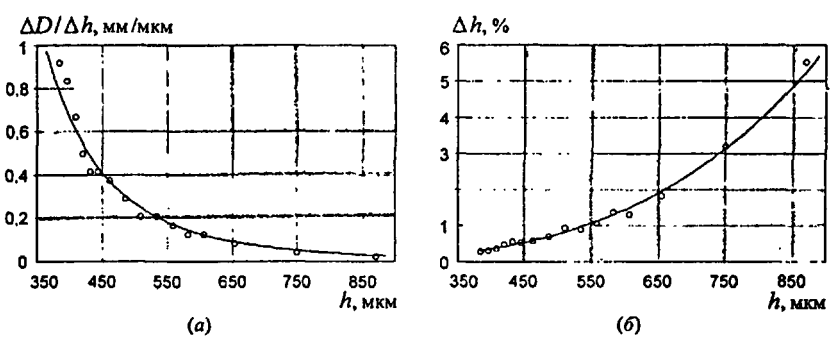

Рис. 5. Зависимость (а) отношения приращения диаметра отклика к приращению толщины слоя, и (б) относительной погрешности определения толщины слоя новым методом на примере слоя октана на эбонитовой подложке при мощности пучка 5.5 мВт.

порядка 0.15 мм/мкм.

При оценке относительной погрешности определения толщины слоя погрешность измерения D приняли равной 1 мм. В диапазоне толщин слоев от критической толщины ТК разрыва слоя, h^*, до $h^* + 300$ мкм указанная погрешность лежит в интервале от 0.3 - 0.6 до 2 - 2.5 %, а при h = 850 мкм не превышает 5 - 6 %, рис. 5 б.

В третьей главе подтверждено свойство аддитивности статической кривизны жидкого мениска, χ_s, и динамической кривизны ТК углубления, χ_d. Это свойство использовано для разработки способа контроля плоскостности свободной поверхности жидкости.

Указанное свойство четверть века тому назад экспериментально обнаружил Б.А. Безуглый, однако полученные результаты носили качественный характер. Вывод об аддитивности был сделан лишь на основании поведения формы отклика[2)]. Прямое определение величин χ_s и χ_d, и доказательство соотношений

$$\chi_b = \chi_s + \chi_d \text{ и } \chi_i = \chi_d \tag{5}$$

где χ_b и χ_i - кривизны свободной поверхности жидкости для ограниченного и неограниченного по горизонтали слоя, отсутствовало.

Здесь схема установки аналогична, показанной на рис. 2, за исключением того, что для создания одномерной статической кривизны свободной поверхности использовали две пластинки, расстояние между которыми, /, выставляли с помощью микрометров. Измеряли стационарные диаметры отклика D_b и D_i, для ограниченного и неограниченного слоя соответственно, и рассчитывали радиусы кривизны поверхности R_i и R_b, соответствующие неограниченному и ограниченному по горизонтали слою. Для прямого

[2)] В случае двух бесконечно длинных плоских границ, помещенных симметрично относительно точки падения луча, когда мениск имеет одномерную кривизну, отклик имеет форму эллипса.

определения статической кривизны, χ_s, индуцирующий пучок ослабляли настолько, чтобы он не вызывал ТК деформации. После этого на экранах измеряли диаметр пучка для ограниченного слоя, который в этом случае определялся лишь статической кривизной мениска.

Если аддитивность статической χ_s и динамической χ_d кривизн выполняется, то как следует из (5), разница между значениями χ_d и χ_i должна давать величину χ_s. На рис. 6 показано сравнение зависимостей $\chi_s(l)$ и $\chi_b(l) - \chi_i(l)$, рассчитанных по данным эксперимента. Т.к. эти зависимости хорошо совпадают, то свойство аддитивности можно считать доказанным.

Оценку чувствительности ТК отклика к величине статической кривизны провели по данным рис. 6. Статический мениск приобретает в центре между пластинками экспериментально обнаружимую кривизну при l = 3.5 см. При этом $\chi_s = 0.0009$ мм$^{-1}$, чему соответствует радиус кривизны мениска 1.1м.

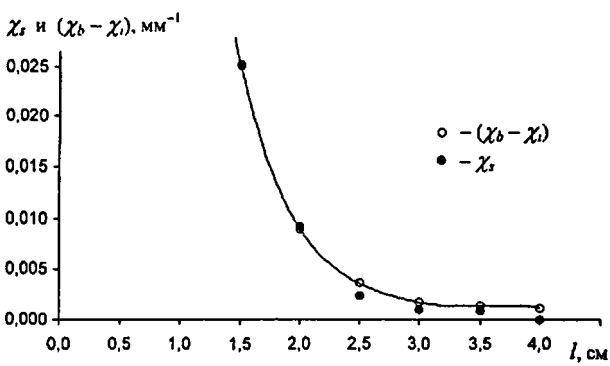

Рис. 6. Сравнение зависимостей кривизны статического мениска, и разницы кривизн поверхности жидкости, для ограниченного и неограниченного по горизонтали слоя от расстояния между пластинками

В четвертой главе описан усовершенствованный метод наклонной пластинки (МНП) измерения краевого угла смачивания, основанный на высокой чувствительности формы ТК отклика к статической кривизне мениска.

Выполнен анализ поведения мениска при наклоне пластинки с различным по отношению к свободной поверхности положением оси вращения, табл. 1.

Табл. 1. Краевые углы, формируемые в момент установления плоскостности свободной поверхности жидкости у наклоняемой пластинки[1].

Положение оси вращения пластинки	Увеличение наклона пластинки	Уменьшение наклона пластинки
вне жидкости	максимально возможный θ_a	минимально возможный θ_r
на линии раздела фаз	минимально возможный θ_r	максимально возможный θ_a
в жидкости	максимально возможный θ_a, если $h < \sqrt{\frac{\sigma}{\rho g}}\, tg\,\theta_{a\,\max}$	минимально возможный θ_r, если $h < \sqrt{\frac{\sigma}{\rho g}}\, tg\,\theta_{r\,\min}$

Примечания:

1. При колебаниях жидкости, углы θ_a будут меньше максимально возможных, $\theta_{a\,\max}$.

В усовершенствованном МНП используют две плоские симметрично наклоняемые пластинки, а момент, когда свободная поверхность жидкости вблизи пластинок становится плоской контролируют по форме ТК отклика. Форму отклика удобно характеризовать коэффициентом одномерной статической деформации $K = (D_b / D_i) - 1$. Для вогнутой свободной поверхности жидкости $K > 0$, для выпуклой $K < 0$, и для плоской $K = 0$.

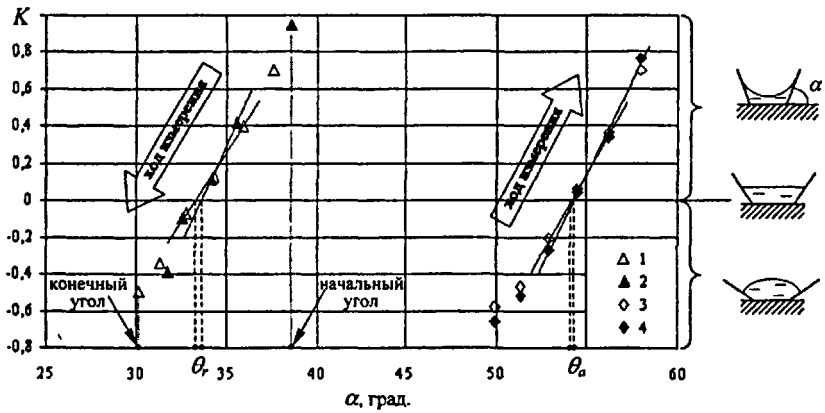

Рис. 7. Зависимость коэффициента одномерной статической деформации от угла наклона пластинок в системе бутанол-1/тефлон

На рис. 7 показана зависимость коэффициента K от угла наклона пластин, α, в системе бутанол-1/тефлон. Кривые 1,2 соответствуют уменьшению угла наклона пластинок от 39 до 28°, а кривые 3, 4 - увеличению от 50 до 58°. Кривые 1,3 отвечают толщине слоя жидкости 435 мкм, а кривые 2,4 - 530 мкм. Совпадение кривых, снятых при разной толщине, говорит о том, что толщина слоя не влияет на эксцентриситет ТК отклика в указанном диапазоне. Пересечение экспериментальных кривых с прямой $K=0$ наступает в момент смены знака статической кривизны поверхности, когда $\alpha = 0$. Экспериментальные зависимости вблизи значений α, когда знак кривизны менялся, аппроксимированы методом наименьших квадратов. Метод сидячей капли (МСК) дал близкие (в пределах экспериментальной погрешности) результаты с усовершенствованным МНП, табл. 2. Из-за отсутствия необходимого оборудования тестовые измерения θ_r не были выполнены.

Табл. 2. Результаты измерения краевого угла усовершенствованным МНП и МСК.

Система	h	θ_r, град	θ_a, град.	
бутанол-1 / тефлон	435 мкм	33.3 ± 0.5	54.1 ± 0.6	(МСК) 54.3 ± 1.0
	530 мкм	33.5 ± 0.4	54.3 ± 0.5	
о-ксилол / тефлон	550 мкм	46.8 ± 0.6	56.3 ± 0.6	(МСК) 56.9 ± 1.0
	620 мкм	46.4 ± 0.6	56.9 ± 0.5	
бензиловый спирт / тефлон	280 мкм	62.3 ± 0.4	80.7 ± 0.8	(МСК) 80.5 ± 1.0
	340 мкм	60.6 ± 0.7	80.2 ± 0.8	

В пятой главе исследовано влияние формы подложки на динамическую кривизну ТК углубления и форму отклика. Полученные зависимости могут быть применены для разработки зеркала-трансформатора распределения интенсивности в лазерном пучке и для определения вязкости жидкости.

В экспериментах использовали установку, рис. 2, где подложкой 8 служил прямоугольный брусок (карболит 45×4×7 мм^3 или эбонит 60×8×(4, 6 и 8) мм^3). Эллиптичный пучок лазера ориентировали так, чтобы его больший диаметр был расположен вдоль длинной стороны бруска. При этом два темных пятна,

симметрично расположенные в распределении интенсивности пучка (рис. *2,* сечение **А-А'**), лежали на линии параллельной оси бруска и служили удобными метками для контроля положения осей в падающем пучке и отклике, рис. 8.

Отклик в случае слоя на бруске имел вид эллипса, рис. 8, фото 3-5, причем его больший диаметр D_1 соответствовал направлению поперек подложки, а меньший D_2 – вдоль[3]. Такой вид отклика объясняется тем, что углубление имело форму лодочки, которую легко наблюдать в скользящих лучах, отраженных от жидкой поверхности. Поперек бруска кривизна ТК зеркала больше, а его фокусное расстояние f меньше, рис. 8.

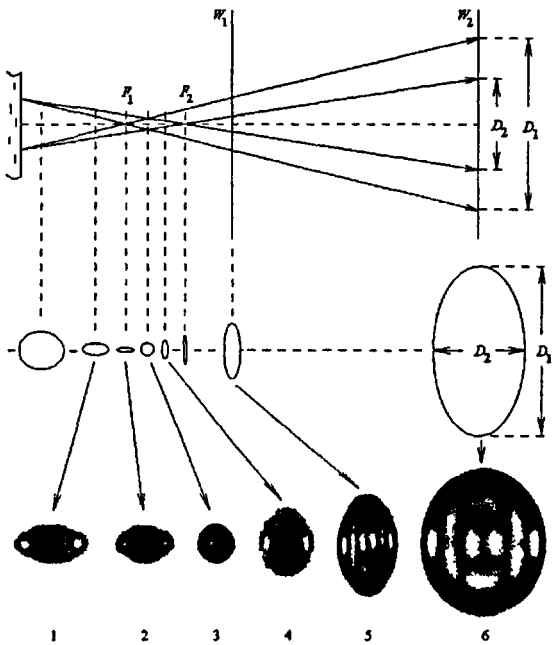

Рис. 8. Качественная иллюстрация изменения формы отклика в зависимости от положения экрана по отношению к фокусам, F_1 и F_2, ТК углубления, полученного в случае слоя на подложке-бруске. Для удобства, поверхность жидкости показана вертикальной и плоской.

---

[3] Если экран находился дальше от слоя, чем область перетяжки отраженного пучка.

На рис. 9 а показана зависимость $\Delta_{12} = D_1/D_2$ от толщины слоя октана для подложек разной ширины. Видно, что с увеличением ширины подложки форма отклика стремится к круглой. Это связано с тем, что ширина подложки становится сравнимой с диаметром ТК вихря, d_v, о чем можно судить по. величине горизонтального диаметра ТК углубления, ϕ, табл. 3.

Табл. 3. Диаметр ТК углубления в направлении поперек подложки в 300 мкм слое различных жидкостей при 25 °С.

Жидкость	октан	бутанол-1	бензиловый спирт
Подложка	эбонит	эбонит	карболит
P, мВт	0.9	0.9	16.6
ϕ, мм	8 – 10	5 – 6	15 – 20

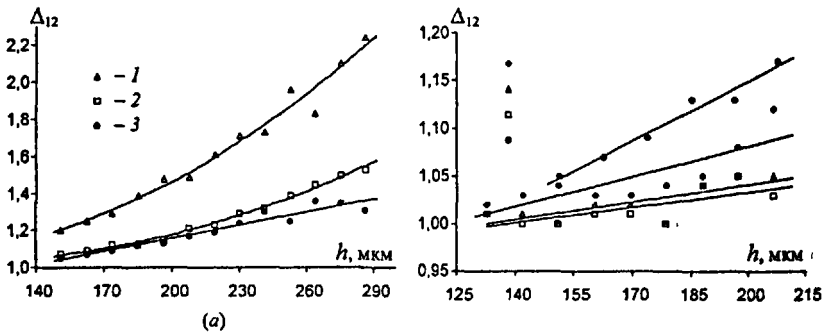

Рис. 9. Зависимость отношения диаметров отклика от толщины слоя (*а*) октана и (*б*) бутанола-1 в случае эбонитовых подложек различной ширины: (1) – 4 мм, (2) – 6 мм, (3) – 8 мм. P = 0.9 мВт, L = 135 см. Для сравнения на рис. 9 *б* дана зависимость (4) для октана при ширине подложки 8 мм.

Аналогичные зависимости для бутанола-1 показаны на рис.95. На подложках шириной 6 и 8 мм отклик был круглым в пределах погрешности оценки Δ_{12}, равной ± 0.03. Это согласуется с тем, что для бутанола-1 ϕ был меньше ширины подложек.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

В работе экспериментально исследована возможность применения ТК конвекции, индуцированной пучком лазера, для диагностики жидкостей и их слоев. Наиболее существенные результаты следующие:

1. Разработан способ задания толщины слоя жидкости по калиброванной проволочке известного диаметра, погрешность которого не превышает 10 мкм.

2. Высокая чувствительность диаметра ТК отклика к толщине жидкого слоя положена в основу бесконтактного метода ее измерения. В интервале толщин ~ 10 мкм погрешность этого метода не превышает 1 -2 мкм, а в интервале ~ 300 мкм не превышает 10-15 мкм. Подбором мощности пучка можно сохранять высокую чувствительность метода в диапазоне не уже 150 - 800 мкм.

3. Экспериментально доказана справедливость принципа аддитивности статической и динамической кривизн поверхности жидкости. Этот принцип использован для разработки метода измерения одномерной статической кривизны поверхности жидкости, и для усовершенствования метода наклонной пластинки измерения краевого угла смачивания.

4. Впервые проанализировано поведение мениска при наклоне пластинки с различным по отношению к поверхности раздела жидкость/газ положением оси вращения (см табл. 1).

5. Показано, что с увеличением толщины слоя фокусное расстояние центральной части ТК углубления растет практически линейно, а с увеличением мощности пучка - уменьшается по степенному закону.

6. Установлено, что подложка в виде бруска влияет на динамическую кривизну ТК углубления. В направлении поперек подложки кривизна становится больше, чем вдоль нее, что связано с более высокими потерями на вязкое трение для ТК течения вдоль бруска. При этом отклик имеет вид эллипса, эксцентриситет которого зависит от вязкости жидкости, что можно использовать для ее определения.

7. В случае слоя жидкости на подложке-пластине, эллиптичность сечения индуцирующего пучка приводит к отклонению формы отклика от круглой. Эксцентриситет отклика растет с толщиной слоя и убывает с мощностью пучка.

ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

1. **Bezuglyi B.A., Shepelenok S.V., Tarasov O.A. Laser flatness control of the liquid surface. // 2nd Int. Aerospace Congress (IAC'97). Abstracts. - Moscow, Russia. STC 'Petrovka'. 1997 - P.244.**
2. **Безуглый Б.А., Тарасов О.А., Федорец А.А. Лазерный метод контроля плоскостности свободной поверхности жидкости // Передовые технологии на пороге XXI века: международная конференция: Тезисы. Ч. 2. - Москва, НИЦ "Инженер", 1998 - С. 370.**
3. **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.**
4. **Безуглый Б.А., Тарасов О.А., Шепеленок СВ. Применение термокапиллярного эффекта для контроля плоскостности жидкой поверхности. // Вестник Тюменского госуниверситета. - 1998. - № 2. - С. 66-71.**
5. **Безуглый Б.А., Федорец А.А.. Тарасов О.А., Шепеленок СВ., Иванова. Н.А. Фотоиндуцированная капиллярная конвекция. - Отчет о НИР. // ВИНИТИ, № ГР 01.99.00 04786, инв. № 0299.00 05481. - 1999.-40 с.**
6. **Безуглый Б.А., Тарасов О.А., Федорец А.А. Применение термокапиллярного эффекта для измерения толщины тонкого слоя жидкости. // Вестник Тюменского госуниверситета. - 2000.-№3.-С. 64-67.**
7. **Безуглый Б.А., Тарасов О.А., Федорец А.А. Применение термокапиллярного эффекта для i усовершенствования метода наклонной пластинки измерения краевых углов смачивания. // Вестник Тюменского госуниверситета. - 2000. - № 3. - С. 64-67.**
8. **Патент РФ № 2149353. Способ измерения толщины тонкого слоя прозрачной жидкости. Безуглый Б.А., Тарасов О.А., Федорец А.А., Шепеленок СВ. - Бюл. № 14 // Изобретения. -2000.**
9. **Патент РФ №2161322. Зеркало-трансформатор гауссова светового пучка в пучок с заданным по радиальному закону распределением интенсивности, и способ его изготовления с параметрами контролируемыми в процессе изготовления. Безуглый Б.А., Тарасов О.А., Федорец А.А. - Бюл. № 36 // Изобретения. - 2000.**
10. **Патент РФ № 2158898. Способ бесконтактного контроля плоскостности поверхности. Безуглый Б.А., Тарасов О.А., Федорец А.А. - Бюл. № 31 // Изобретения. - 2000.**
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., Федорец А.А., Тарасов О.А. Применение индуцированной лазерным излучением капиллярной конвекции в методах бесконтактного контроля реологических характеристик органических жидкостей и степени загрязнения воды органическими - примесями. - Отчет о НИР. // ВИНИТИ, № ГР. 02.200.1 07533, инв. №01. 2001103608. - 2001.-62 с.**
13. **Bezuglyi B.A., Fedorets A.A., Ivanova N.A., Tarasov O.A. Photoinduced capillary effect in the MOMLS-technologies. // First Conference of the International Marangoni Association. - Giessen, Germany, 2001 - P. 82-83.**
14. **Bezuglyi B.A., Fedorets A.A., Tarasov O.A. Laser diagnostics of liquids and its layers. // First Conference of the International Marangoni Association. - Giessen, Germany, 2001 - P. 84-85.**

15. Безуглый Б.А., Тарасов О.А. Оптические свойства термокапиллярного углубления // Оптика и спектроскопия.- 2002. - том 92. - № 4. - С.609-613.
16. Безуглый Б.А., Федорец А.А., Тарасов О.А., Иванова Н.А., Зуева А.Ю. Фотоиндуцированная капиллярная конвекция - новое капиллярное явление. - Отчет по гранту РФФИ № 01-01 -652-а. // URL: http://library.intra.ru. - 2002..
17. Безуглый Б.А., Федорец А.А., Тарасов О.А., Чаппаров Ф.Х. Применение индуцированной лазерным излучением термокапиллярной конвекции для диагностики жидкостей и их слоев, контроля и преобразования параметров лазерных пучков. - Отчет по губернаторскому гранту поддержки молодых ученых. // ВИНИТИ, № ГР. 01.200.20 0837, - 2002. - 58 с.
18. Патент РФ №2178163. Способ измерения углов смачивания с помощью наклонной пластинки, основанный на использовании эффекта индуцированной лазерным пучком термокапиллярной конвекции. Безуглый Б.А., Тарасов О.А., Федорец А.А. - Бюл. № 1 // Изобретения. - 2002.
19. Bezuglyi B.A., Tarasov O.A., Fedorets A.A. Improved tilting-plate method for measuring contact angles. // XII International Conference "Surface forces". Abstracts. - Moscow, Russia, July 2002- P. 136.
20. Безуглый Б.А., Тарасов О.А. Влияние эллиптичности индуцирующего пучка на форму термокапиллярного отклика. // Оптика и спектроскопия. - 2003. - том 94. - № 2. - С. 259-263.
21. Bezuglyi B.A., Tarasov O.A., Fedorets A.A. Improved tilting-plate method for measuring contact angles // 16-я Европейская конференция по химии межфазных поверхностей: Тезисы докладов. Владимир, Россия, Май 2003. - Издательство УНЦ ДО, Москва, - С. 81.
22. Bezuglyi B.A., Tarasov O.A. The additivity of the dynamic curvature of thermocapillary depression and the static curvature of liquid meniscus // 16-я Европейская конференция по химии межфазных поверхностей: Тезисы докладов. Владимир, Россия, Май 2003. - Издательство УНЦ ДО, Москва, - С. 82.
23. Безуглый Б.А., Тарасов О.А. Чувствительность термокапиллярного метода измерения толщины слоя прозрачной жидкости на горизонтальной поглощающей поверхности. // Письма в ЖТФ. - 2004. - том 30. - № 4. - С. 20-24.

ЦИТИРОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

1. Bell A.G. // Am. J. Sci. Vol. 20, p. 305 (1980).
2. Tyndall J. //Proc. Roy. Soc. London, Vol. 31, p. 307 (1881).
3. Reontgen W.G.//Philos.Mag., Vol. 11, p. 308(1881).
4. Gordon J.P. et. al. // Bull. Am. Phys. Soc. Vol. 9, p. 501 (1964).
5. Boccara A.C. et. al.//Appl Phys. Lett Vol 36, p 130(1979).
6. Bezuglyi B.A.// PhD Thesis. MSU. Moscow (1983).
7. Da Costa G.,CalatroniJ.//Appl. Opt. Vol. 17,No. 15, p. 2381 (1978).

Подписано в печать 27.04.04. Тираж 100 экз.
Объем 1,0 уч.-изд. л. Формат 60x84/16. Заказ 270.

Издательство Тюменского государственного университета
625000, г. Тюмень, ул. Семакова, 10.
Тел./факс (3452) 46-27-32; E-mail: izdatclstvo@utmn.ru

№ 11763