

Тюменский государственный университет

На правах рукописи

ФЕДОРЕЦ Александр Анатольевич

**Фотоиндуцированный термокапиллярный эффект и его
применение для измерения свойств жидкостей**

02.00.04 – Физическая химия

Автореферат

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

Тюмень – 2002

Работа выполнена в Тюменском государственном университете на кафедре радиофизики

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

Официальные доктор физико-математических наук,
оппоненты: профессор **Новиков Виталий Федорович**

доктор физико-математических наук,
старший научный сотрудник
Шавлов Анатолий Васильевич

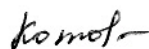
Ведущая Институт физической химии РАН,
организация г. Москва

Защита состоится 29 ноября 2002 г. в ____ час. ____ мин. на заседании диссертационного совета К 212.274.04 в Тюменском государственном университете по адресу: 625003, г. Тюмень, ул. Перекопская 15а, ауд. ____.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Тюменского государственного университета.

Автореферат разослан « ____ » _____ 2002 г.

*Ученый секретарь
диссертационного совета
кандидат химических наук,
ст. преподаватель*



Котова Т.П.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. Разработка методов измерений, основанных на новых физических эффектах, является одной из приоритетных задач науки. Данная работа посвящена изучению возможности применения для измерений физических свойств жидкостей фотоиндуцированного термокапиллярного (ФТК) эффекта, открытого в конце 70-х годов независимо Г. Да Костой и Б.А. Безуглым. Эффект наблюдается при облучении пучком лазера слоя жидкости со свободной поверхностью. Индуцируемое пучком локальное тепловое возмущение порождает термокапиллярные (ТК) течения, деформирующие свободную поверхность слоя в виде углубления, профиль которого зависит от ряда (более десяти) характеристик системы «лазерный Пучок / жидкий Слой / Подложка» (система ПСП). Поместив экран в поперечное сечение отраженного углублением пучка лазера, можно наблюдать интерференционную картину, называемую ТК откликом.

Идея использования ТК отклика в качестве источника информации о системе ПСП довольно долго не имела развития из-за того что ФТК эффект, принадлежащий междисциплинарной области на стыке оптики, теории тепло-массо-переноса, физической химии и т.д., изучали как объект теплофизики или гидродинамики, при этом отклик почти всегда оставался за рамками исследований.

До недавнего времени, с одной стороны, было известно о существовании зависимостей ТК отклика от свойств жидкости, перспективных для создания бесконтактных методов измерений. С другой стороны, не был развит подход (система параметров отклика и углубления, методы их измерения, терминология и т.д.) к исследованию ФТК эффекта и требовались обширные исследования зависимостей отклика и углубления от таких характеристик системы ПСП как толщина жидкого слоя, мощность пучка, оптические свойства жидкости и т.д.

Целью работы является разработка экспериментальных методов исследования ФТК эффекта, раскрытие взаимосвязей характеристик системы ПСП и

параметров ТК углубления и отклика, а также изучение возможности применения ФТК эффекта для измерения ряда свойств жидкостей.

Научная новизна работы определяется тем, что:

1. Разработан фотоабсорбционный метод измерения глубины ТК прогиба, позволяющий исследовать динамику процесса развития углубления, а также усовершенствована техника регистрации отклика.

2. Впервые экспериментально исследованы процессы развития и релаксации ТК углубления и отклика.

3. Изучен ряд зависимостей параметров ТК отклика от характеристик системы ПСП, которые можно использовать в бесконтактных методах измерений.

Практическая ценность работы состоит в следующем:

1. Внесен вклад в развитие экспериментальных подходов, методов и техники исследований ФТК конвекции;

2. Определены шесть новых областей применения ФТК эффекта, в рамках которых предложены около десятка принципиально новых методов измерения характеристик жидкого слоя, параметров лазерного пучка и т.д., а также способы изготовления оптических элементов и удаления жидких загрязнений.

Достоверность результатов исследования подтверждается тем, что полученные данные воспроизводимы; не противоречат друг другу и независимым источникам, а также согласуются с физической интуицией, вытекающей из основных законов механики жидкости, теплофизики, оптики и т.д.

На защиту выносятся:

1. Фотоабсорбционный метод измерения глубины ТК прогиба и усовершенствованная схема регистрации ТК отклика;

2. Результаты исследований процессов развития и релаксации ТК углубления и ТК отклика;

3. Ряд новых применений ФТК эффекта.

Апробация работы. Результаты работы были доложены на: Международной конференции по коллоидной химии и физико-химической механике (Москва, 1998 г.), Международной конференции "Передовые технологии на пороге

XXI века" (ICAT'98, Москва, 1998 г.), Третьем Международном аэрокосмическом конгрессе (IAC'2000, Москва, 2000 г.), Первой конференции Международной Ассоциации Марангони (ИМА'2001, Гиссен, Германия, 2001 г.), регулярно обсуждались на научно-методических семинарах физического факультета ТюмГУ и научных семинарах лаборатории «Жидкостные микрогравитационные технологии».

Публикации. По теме диссертации опубликовано 30 работ, список основных публикаций приведен в конце автореферата.

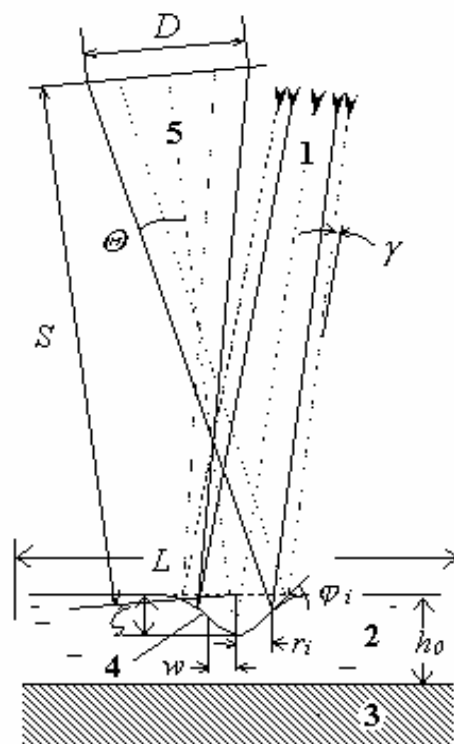
Структура работы. Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы и пяти приложений. Объем 146 страниц, 78 рисунков, 5 таблиц, список литературы из 129 наименований.

КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении определены объект и предмет исследования, поставлена цель. Обоснованы научная новизна и актуальность работы.

Первая глава. Рассмотрены эффекты взаимодействия оптического излучения с жидкостью. Показано, что в условиях исследования доминирующим является фотоиндуцированный термокапиллярный (ФТК) эффект. Введена система обозначений, Рис. 1. Выполнен обзор литературных источников по ФТК эффекту. Перечислены области применения фототермических эффектов.

Рис. 1. Геометрические параметры системы ПСП, ТК углубления и отклика: 1 пучок лазера, индуцирующий в жидком слое 2 на твердой подложке 3 ТК углубление 4. Лучи 5, отраженные поверхностью слоя, образуют пучок, в поперечном сечении которого наблюдается ТК отклик. Здесь L протяженность слоя, а h_0 его толщина, S расстояние от слоя до экрана; w радиус индуцирующего углубления пучка в плоскости слоя по уровню I_0/e , а γ – его расходимость; Θ расходимость пучка отклика; ζ глубина ТК прогиба, r_i расстояние от оси углубления до точек его поверхности, в которых локальная кривизна ТК углубления изменяет знак. Множество этих точек образует линию перегиба на которой уклон φ поверхности ТК прогиба максимален и определяет расходимость отраженного пучка и диаметр ТК отклика.



Во второй главе описан новый фотоабсорбционный метод измерения глубины ТК прогиба и приведены экспериментальные данные, раскрывающие влияние на процесс развития углубления мощности индуцирующего пучка, показателя поглощения жидкости и толщины ее слоя. Обобщенная схема экспериментальной установки показана на Рис. 2.

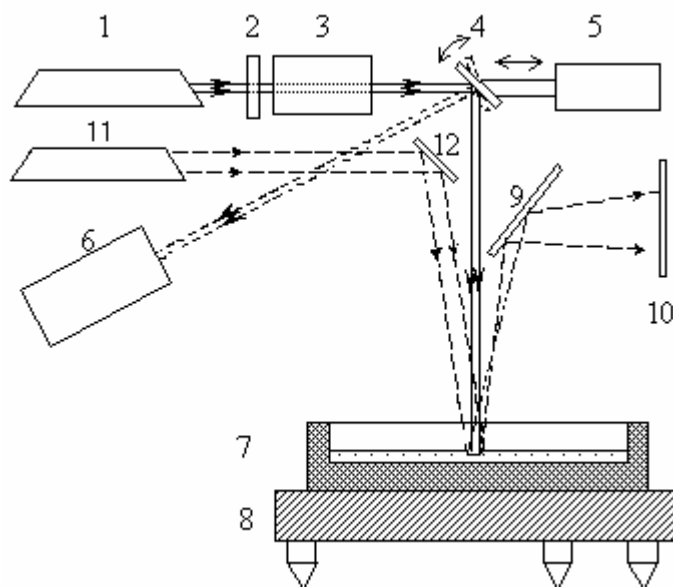


Рис. 2. Схема экспериментальной установки. Здесь 1 индуцирующий лазер; 2 электромеханический затвор, 3 магазин калиброванных светофильтров; 4,9,12 зеркала; 5 микрометр, 6 головка измерителя мощности оптического излучения ИМО-2, 7 кювета с жидкостью; 8 подставка для кюветы, с микрометрическими винтами для выставления горизонтальности слоя; 10 экран; 11 пробный лазер.

В рассмотренных в обзоре работах в качестве энергетического параметра индуцирующего пучка, как правило, приводят его мощность P . Однако, учитывая градиентную природу ТК течений, правильнее характеризовать пучок эффективной интенсивностью $I_w = P/\pi w^2$. Это подтверждает Рис. 3, из которого видно, что при постоянной мощности пучка, изменение его диаметра w на слое существенно сказывается на ТК отклике. В этой же серии опытов, при уменьшении диаметра пучка был зафиксирован эффект трансформации интерференционной структуры отклика в распределение гауссова типа. Механизм этого эффекта объясняет опыт с пробным пучком, Рис. 4. Изменяя диаметр пробного пучка можно наблюдать стадии трансформации ТК отклика от гауссова распределения при узком пучке, до типичной для ТК отклика интерференционной структуры при широком пучке.

Так как ТК отклик от индуцирующего пучка несет неполную информацию о профиле ТК прогиба, здесь впервые применен широкий пробный пучок, заведомо охватывающий всю область ТК деформации.

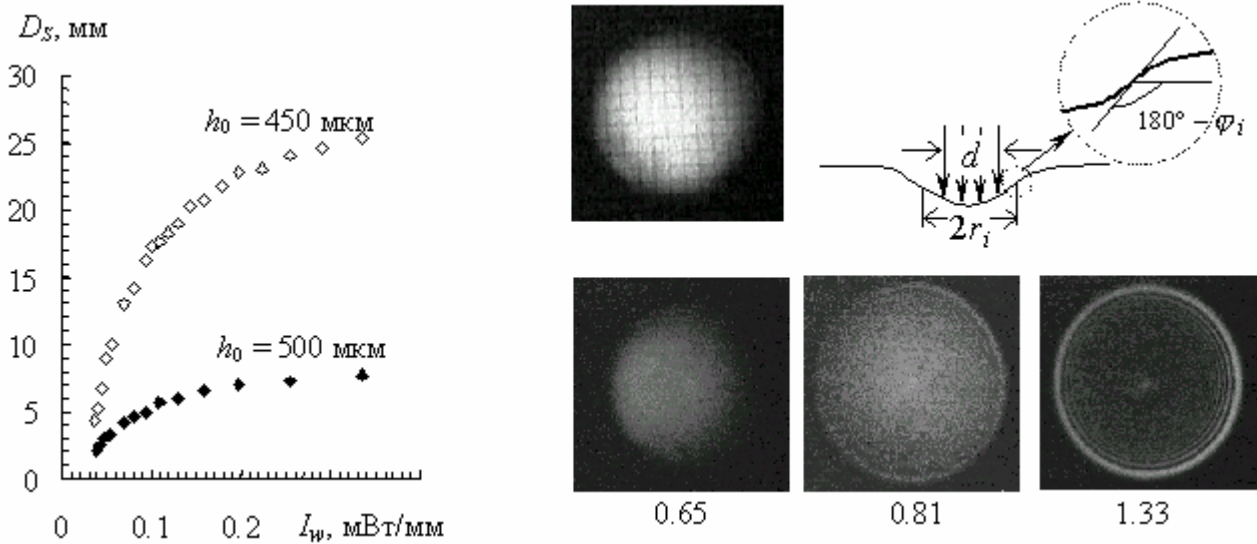


Рис. 3. Зависимость диаметра стационарного ТК отклика от эффективной интенсивности пучка постоянной мощности (2.6 мВт) для слоев октана разной толщины.

Рис. 4. Влияние диаметра лазерного пучка на ТК отклик. Верхний снимок – ТК отклик от узкого индуцирующего пучка, нижняя серия фотографий – ТК отклики от пробного, не влияющего на ТК углубление пучка переменного диаметра. Под фотографиями даны отношения d_p / d_i диаметров на жидком слое пробного и индуцирующего пучков. В верхнем правом углу приведен рисунок, поясняющий причину исчезновения интерференционной структуры ТК отклика при уменьшении диаметра лазерного пучка.

Фотоабсорбционный метод измерения глубины ТК прогиба, основан на законе Бугера-Ламберта-Бера:

$$I = I_0 e^{-a \cdot h_c} \quad (1),$$

где: a – показатель поглощения жидкости, I_0, I – интенсивности излучения падающего на свободную поверхность жидкого слоя и прошедшего сквозь слой под дном углубления. Дно определим как область углубления радиусом r_b , в которой выполняется $h(r_b) - h_c \leq \Delta \zeta$, где $\Delta \zeta$ погрешность измерений.

Эксперимент проводили с двумя растворами нильского синего в бензиловом спирте разной оптической плотности в следующем порядке: 1) при перекрытом затворе, Рис. 1, создавали заданный слой жидкости; 2) открывали затвор и с помощью цифрового осциллографа и компьютера записывали зависимость сигнала фотодиода от времени; 3) затвор закрывали и во время релаксации углубления изменяли мощность пучка; 4) повторяли действия пункта 2.

Для растворов красителя нильского синего в бензиловом (с оптической плотностью $a_{0.63} = 45.8$ и 22.9 мм^{-1} , растворы № 1 и № 2, соответственно) было

получено шесть семейств эволюционных зависимостей $\zeta(t)$, Рис. 5, при разной толщине слоя и интенсивности индуцирующего пучка.

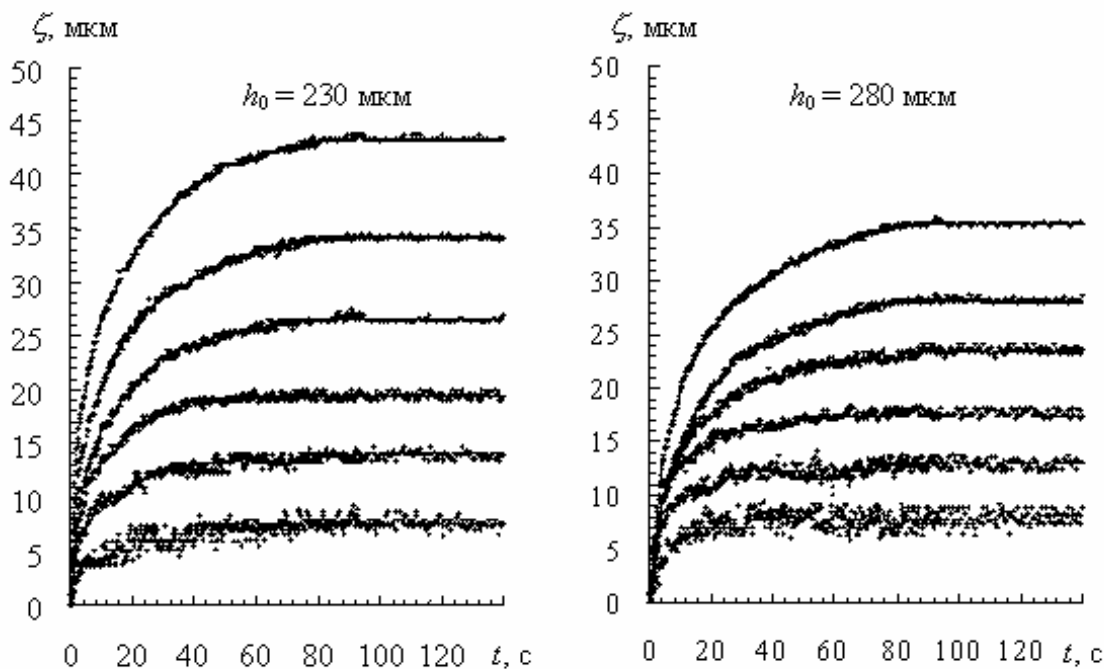


Рис. 5. Примеры графиков семейств эволюционных зависимостей. Раствор № 2, зависимости в последовательности сверху вниз получены при интенсивности индуцирующего пучка $I_w = 3.45, 2.40, 1.72, 1.22, 0.60, 0.43$ мВт / мм².

Точность измерения ζ фотоабсорбционным методом во многом определяется тем, насколько удачно выбран диаметр d_c канала фотоприемника. С одной стороны, он должен быть достаточно узким, чтобы соотношение

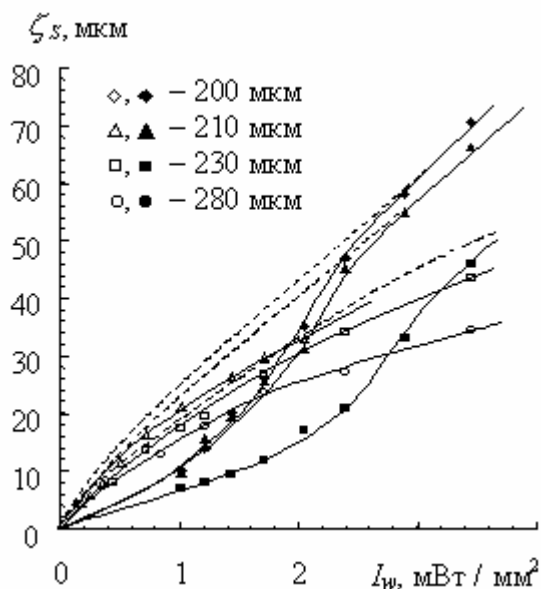
$$d_b \geq d_c \quad (2),$$

($d_b = 2r_b$) выполнялось с первых секунд роста ТК углубления (иначе измеряемая глубина ζ_m ТК прогиба будет занижаться относительно истинной ζ_{tr}), с другой стороны канал, должен пропускать световой поток надежно регистрируемый фотодиодом. Так как диаметр конвективного вихря в несколько раз превышает видимый диаметр d индуцирующего пучка на слое, и наблюдаемый визуально размер углубления также в 2...3 раза больше d , то первые опыты, Рис. 5, проводились при $d_c = 1$ мм и $d = 3$ мм.

На Рис. 6 показаны зависимости стационарной глубины ζ_s ТК прогиба от интенсивности пучка построенные по данным эволюционных зависимостей.

Неожиданными являются качественные отличия в поведении зависимостей для растворов № 1 и № 2. Если для более прозрачного раствора № 2 зависимости для всех толщин подобны и хорошо аппроксимируются степенными функциями, то поведение зависимостей № 1 заметно сложнее – они имеют *S*-образную форму. Наиболее странно то, что при малых I_w зависимости для оптически более плотного раствора № 1 лежат ниже зависимостей № 2, в то время как, повышение α и связанное с этим обострение индуцируемого пучком температурного градиента, должно вызывать интенсификацию конвекции и увеличение глубины ТК прогиба.

Рис. 6. Зависимость стационарной глубины ТК прогиба от интенсивности индуцирующего пучка. Зачерненные маркеры относятся к раствору № 1, светлые – раствору № 2. *S*-образный вид зависимостей в случае раствора № 1 связан с нарушением в процессе измерений условия $d_b \geq d_c$, из-за чего измеренная ζ_s занижалась относительно истинной. Пунктиром показан реальный ход зависимостей № 1.

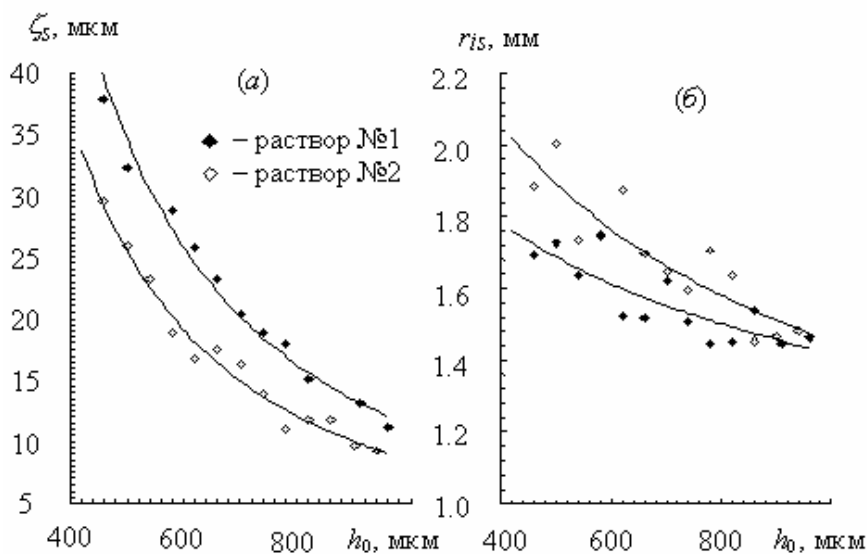


Поведение зависимостей, Рис. 6, можно объяснить, если допустить, что с увеличением α , при прочих равных условиях, стационарная глубина ТК прогиба, растет при уменьшении диаметра его дна. Тогда, сужение углубления в случае раствора № 1 могло привести к нарушению в процессе измерений неравенства (2) и занижению измеренной глубины относительно истинной. Увеличение размера ТК прогиба с ростом I_w , устраняет причину занижения. Поэтому реальный ход зависимостей проявляется на «хвостах» зависимостей № 1, которые, как и в случае раствора № 2, аппроксимируются степенными функциями.

Правильность гипотезы о сужении радиальных размеров ТК углубления с ростом оптической плотности жидкости, подтверждают данные опытов при уменьшенном до 250 мкм канале фотоприемника, Рис. 7, где одновременно с

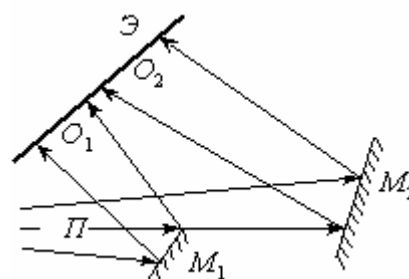
глубиной ТК прогиба измерялся (по расходимости Θ_s пучка ТК отклика) радиус r_i окружности перегиба ТК углубления.

Рис. 7. Влияние толщины слоя на стационарную глубину (а) и радиуса окружности перегиба (б) ТК углубления в случае жидкостей разной оптической плотности.



В третьей главе приведены результаты исследования процесса развития и релаксации ТК углубления, полученные по эволюционным зависимостям расходимости Θ пучка ТК отклика от пробного лазера. Этот метод, в отличие от фотоабсорбционного, не критичен к оптическим свойствам жидкости. На Рис. 8 показана схема проецирования пучка ТК отклика, позволяющая фиксировать динамику развития и релаксации Θ , используя видеозапись с единственного экрана.

Рис. 8. Схема проецирования на экран (Э) пучка ТК отклика (П) от пробного лазера. Ближнее к слою зеркало (M_1) отсекает половину пучка, вторая половина, отразившись от зеркала (M_2), попадает на экран, с которого отклики фиксируются видеокамерой.



Каждый опыт включал следующие стадии: 1) при открытом затворе выдерживали время необходимое для стационаризации ТК углубления; 2) индуцирующий пучок перекрывали, и с помощью пробного пучка записывали процесс релаксации отклика; 3) когда ТК деформация исчезала, затвор открывали и записывали процесс развития отклика. Опыты проводили: а) со слоями бензилового спирта на поглощающей излучение теплопроводной стеклянной подложке (оптическое стекло СС4, $k \cong 1.2$ Вт / м·К); б) со слоями чистого бензилового

спирта и раствора № 2 на поглощающей слабо теплопроводной, подложке (эбонит, $k \cong 0.16$ Вт/м·К). Примеры графиков эволюционных зависимостей приведены на Рис. 9.

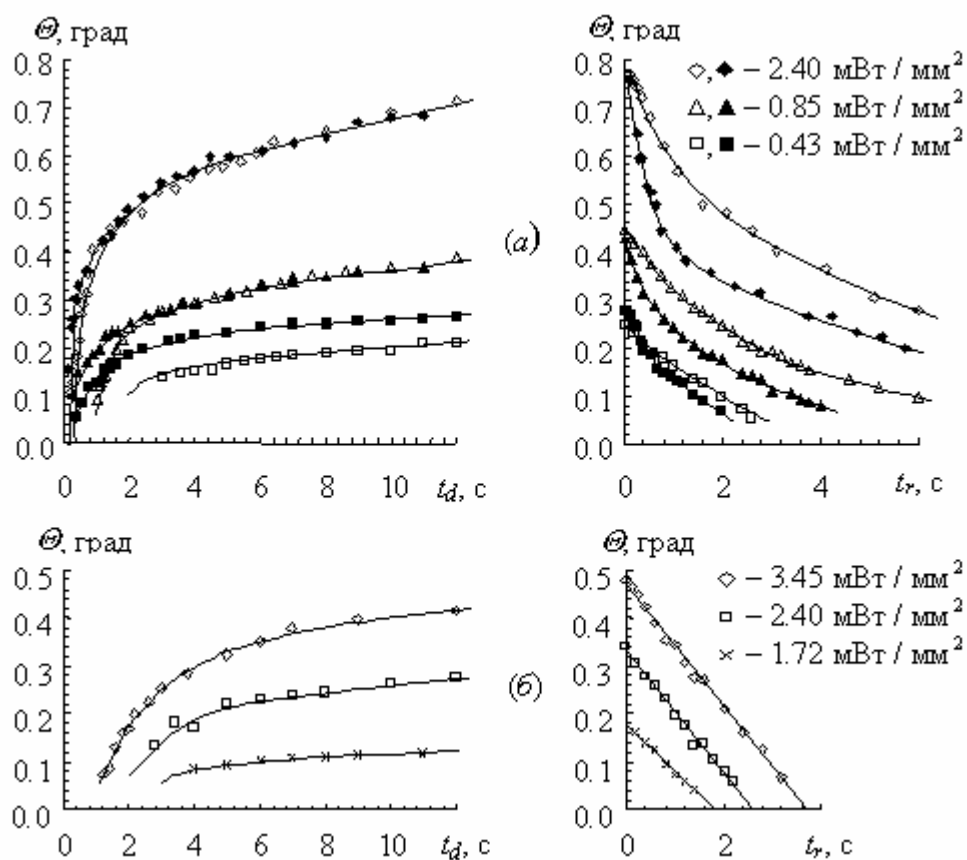


Рис. 9. Графики эволюционных зависимостей угла Θ расходимости пучка отклика. Правые графики – развитие отклика, левые – релаксация. (а) Эбонитовая подложка, чистый бензиловый спирт (прозрачные маркеры) и раствор № 2 (зачерненные), $h_0 = 380$ мкм. (б) Стеклопанельная подложка, бензиловый спирт, $h_0 = 105$ мкм.

Из Рис. 9а можно заключить, что для прозрачной (по сравнению с поглощающей) жидкости развитие отклика запаздывает, причем с уменьшением I_w запаздывание увеличивается. Запаздывание, отчасти, обусловлено временем распространения теплового фронта $t_K = h_0^2 / \kappa_l$, где κ_l температуропроводность жидкости. При $h_0 = 380$ мкм, $\kappa_l \approx 2 \cdot 10^{-7}$ Вт/м·К, имеем $t_K \approx 0.7$ с. Другая причина запаздывания связана со временем прогрева подложки до температуры включения конвекции. Поэтому, чем мощнее пучок, тем раньше развивается отклик.

Наиболее быстро конвекция затухает в слоях на высокотеплопроводной стеклянной подложке, Рис. 9б, а медленней всего – в прозрачном жидком слое на аккумулирующей тепло эбонитовой подложке. Относительно быстрая релаксация отклика для поглощающего слоя, Рис. 9б свидетельствует о том, что в этом случае конвективные течения запирают поток тепла в подложку и тепловой источник сосредоточен, главным образом, в жидкости.

В четвертой главе описаны результаты экспериментального исследования ФТК эффекта, которые легли в основу его новых приложений.

Метод измерения толщины жидкого слоя. Сильная зависимость диаметра D ТК отклика от толщины h_0 слоя описана в одной из первых работ Б.А. Безуглого по ФТК эффекту, но развитие метода измерения h_0 осложняло отсутствие простого способа получения калибровочных кривых. Решение подсказали опыты с клиновидным жидким слоем, в которых было установлено, что деформированный из-за неоднородности слоя ТК отклик, Рис. 10, характеризуется диаметрами, D_α (зависит от угла α клиновидности слоя) и D_h (определяется локальной толщиной слоя, h , на оси пучка). Калибровочные кривые, Рис. 11, можно получить путем сканирования слоя известной клиновидности.

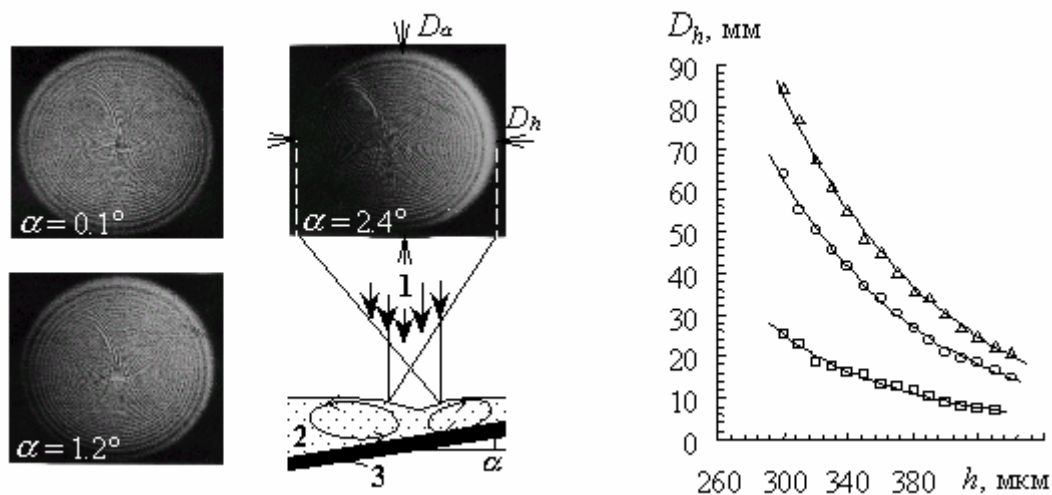


Рис. 10. Примеры ТК откликов в случае клиновидного жидкого слоя и рисунок, поясняющий механизм деформации формы и распределения интенсивности ТК отклика. Здесь, 1 лазерный пучок, 2 жидкость, 3 подложка.

Рис. 11. График зависимостей диаметра ТК отклика от локальной толщины клиновидного ($\alpha = 2.25^\circ$) жидкого слоя. В порядке сверху вниз расположены кривые для октана, бутанола, и вазелинового масла. Индуцирующий He-Ne лазер, $\lambda = 0.63$ мкм, $I_w = 1.4$ мВт /мм. Расстояние от слоя до экрана 370 см.

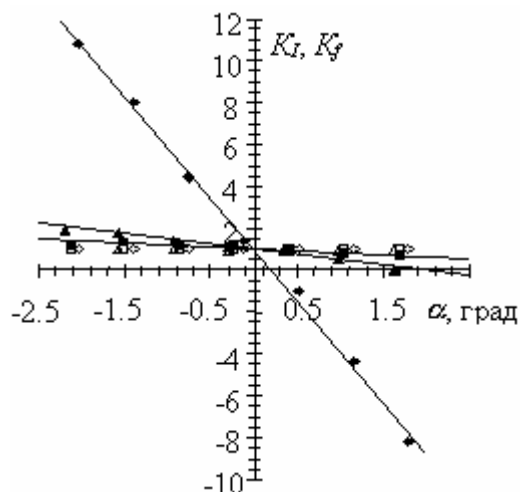
Метод контроля горизонтальности поверхности основан на описанном выше эффекте нарушения осевой симметрии ТК отклика при клиновидном слое жидкости. Искажение формы и перераспределение интенсивности ТК отклика характеризуем безразмерными коэффициентами:

$$K_f = \begin{cases} D_h/D_\alpha, & \alpha \leq 0 \\ 1 - (D_h/D_\alpha), & \alpha > 0 \end{cases} \quad \text{и} \quad K_I = \begin{cases} I_{max}/I_{min}, & \alpha \leq 0 \\ 1 - (I_{max}/I_{min}), & \alpha > 0 \end{cases} \quad (3),$$

где I_{max} и I_{min} яркость внешнего кольца отклика в сечении диаметра D_α .

Перераспределение интенсивности отклика усиливается с уменьшением вязкости жидкости, Рис. 12, в то время как на форме ТК отклика α почти не сказывается. Чувствительность ε_α нового метода оценим на примере октана, Рис. 12: имеем $\varepsilon_\alpha = \Delta K_I / \Delta \alpha = 4.9 \text{ град}^{-1}$, а значит, определяя I_{min} / I_{max} с точностью 0.1 %, можно измерять уклон подложки с разрешением $\alpha = 0.01 / 4.9 = 0.0002^\circ$, доступным лишь для лучших маятниковых наклономеров. Кроме того, инертность ТК вихря делает метод устойчивым к микровибрациям, о чем свидетельствует тот факт, что «пляска» светового зайчика от свободной поверхности жидкого слоя прекращается по мере развития ТК отклика.

Рис. 12. Влияние клиновидности слоя на форму и распределение интенсивности ТК отклика в случае жидкостей разной вязкости. Зависимости $K_I(\alpha)$ показаны зачерненными маркерами, светлыми – $K_f(\alpha)$. Ромбические, треугольные и квадратные маркеры относятся к слоям октана (0.55), бензилового спирта (5.8) и вазелинового масла (28). В скобках дана вязкость жидкостей в Па·с, при температуре проведения опытов (20 °С).

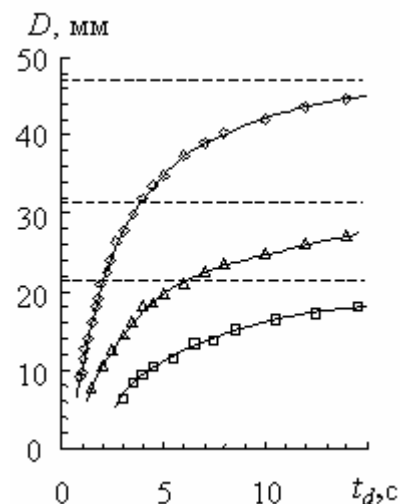


Измерение вязкости жидкости. Предложен подход к измерению вязкости μ объединяющий ряд методов, уникальных тем, что как воздействие на жидкость, так и считывание ее реакции осуществляется бесконтактно, пучком лазера.

Экспериментально показано, что среди физических свойств жидкости, влияющих на процесс формирования ТК отклика, вязкость играет доминирую-

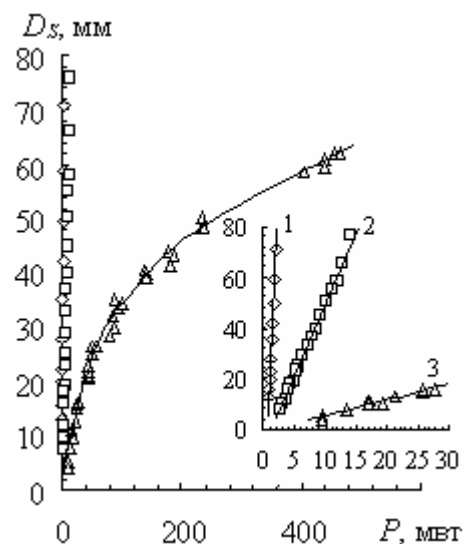
щую роль. Обнаружена сильная зависимость от μ распределения интенсивности отклика при клиновидном жидком слое. Установлено, что влияние вязкости проявляется с первых секунд развития отклика, Рис. 13. Предложен динамический метод измерения вязкости.

Рис. 13. Влияние вязкости жидкости на развитие ТК отклика с момента начала облучения жидкого слоя. Сверху вниз расположены зависимости для слоев ($h_0 = 300$ мкм) бутанола-1 (3.64), бензилового спирта (5.8) и вазелинового масла (28). В скобках приведена вязкость в Па·с при температуре проведения опытов (20 °С). ТК углубление индуцировали пучком He-Ne лазера, $\lambda = 633$ нм, $I_w \cong 0.5$ мВт / мм². Пунктирные горизонтальные линии являются асимптотами зависимостей, т.е. соответствуют их установившимся ($t > 60$ с) значениям.



Методы измерения энергетических параметров лазерного пучка. График зависимостей стационарного диаметра D_s ТК отклика от мощности P непрерывного пучка в случае разных систем ПСП показан на Рис. 14. По данным рисунка можно заключить, что а) для измерения P пригодны как поглощающие излучение, так и прозрачные слои на поглощающей подложке, т.о. можно изготовить как широкополосные, так и селективные приемники излучения; б) динамическим диапазоном измерений можно управлять, изменяя толщину слоя и (или) вязкость жидкости; в) во всех рассмотренных системах ПСП измерение D_s с

Рис. 14. Зависимость диаметра стационарного отклика от мощности индуцирующего пучка. Часть графика при малых значениях мощности показана с увеличенным разрешением. Эбонитовая подложка. Зависимости 1 и 2 – отклик от индуцирующего пучка He-Ne лазера в случае слоя октана толщиной $h_0 = 200$ и 500 мкм, соответственно; 3 – индуцирующий CO₂ лазер, слой вазелинового масла $h_0 = 3.8$ мм, поглощающий 90 % ИК излучения в приповерхностном слое толщиной 430 мкм.



точностью 0.5 мм, дает относительную погрешность не более 3 %, а в случае тонкого слоя октана обеспечивает разрешение ~ 10 мкВт. Кроме этого, установлено, что по динамике развития отклика можно измерять и энергию одиночных лазерных импульсов.

Метод изготовления зеркал-трансформаторов распределения интенсивности лазерного пучка. Благодаря своей форме ТК прогиб может трансформировать распределение интенсивности лазерного пучка, но использовать в качестве оптического элемента «жидкое» углубление проблематично. Выход был найден на основе методов фотофабрикации оптических элементов (линз и призм), разработанных японскими учеными (Keiichiro Kagawa и др.) Суть метода изготовления зеркал-трансформаторов состоит в том, что в слое фотополимера индуцируют углубление, оптическими свойствами которого управляют изменяя параметры системы ПСП, и по достижению необходимых характеристик ТК прогиба, слой полимеризуют УФ вспышкой. Затем, на полимерную заготовку наносят отражающее покрытие. Примеры распределений интенсивности, которые можно получить из гауссова пучка с помощью зеркал-трансформаторов, показаны на Рис. 15.

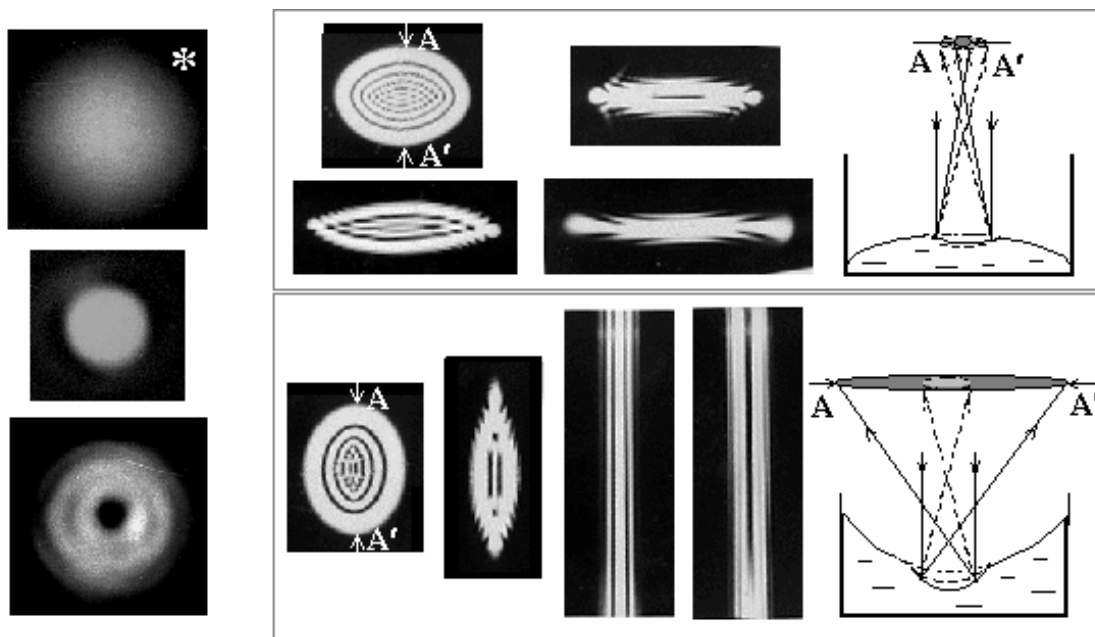


Рис. 15. Исходный гауссов пучок (*) и примеры распределений, получаемых с применением свойства ТК углубления. Рисунки поясняют механизм изменения формы ТК отклика, в результате сложения динамической кривизны ТК углубления и статической кривизны (цилиндрического мениска) свободной поверхности слоя.

Метод очистки твердой поверхности от жидких загрязнений. Предложен и экспериментально апробирован метод удаления жидких загрязнений с помощью сфокусированного в линию светового пучка (светового скребка), индуцирующего ТК течения. Пример действия светового скребка показан на Рис. 16.

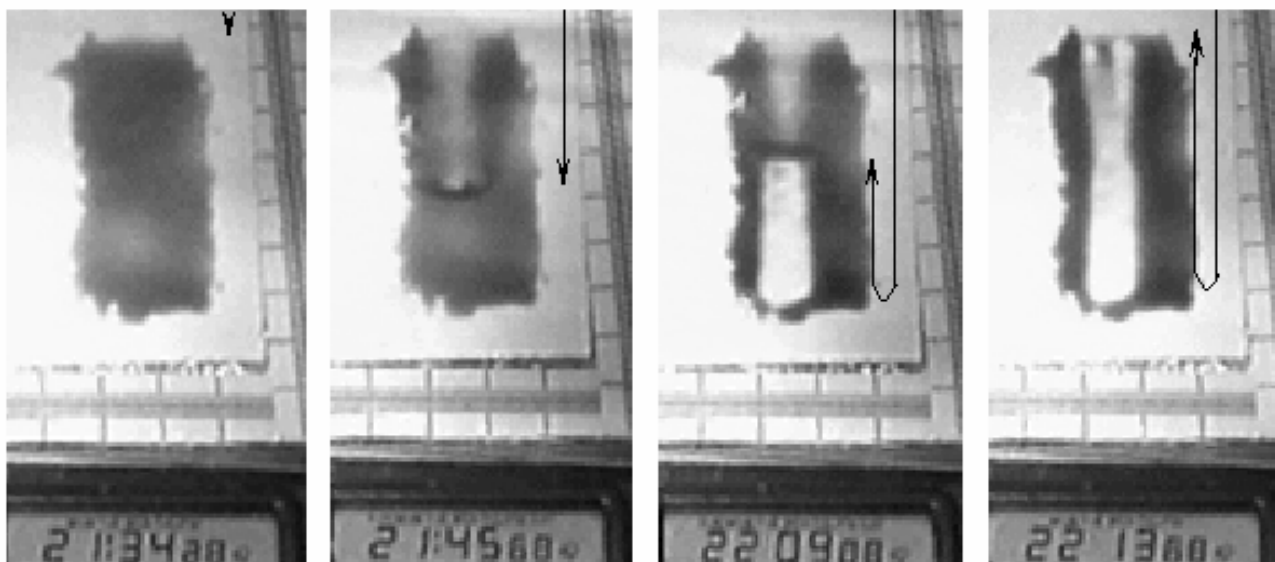


Рис. 16. Образование дорожки в слое машинного масла толщиной $h_0 = 70$ мкм на стеклянной подложке при перемещении пучка лазера (CO_2 , $\lambda = 10,6$ мкм, $P = 2.5$ Вт, $I = 0.35$ Вт/мм²). Стрелки показывают траекторию движения пучка. Цена деления 1 см.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

1. Усовершенствована методика регистрации ТК отклика:

1.1. Показано, что ТК отклик от лазерного пучка, индуцирующего ФТК эффект, несет информацию о профиле лишь центральной области ТК углубления, поэтому в научных исследованиях для считывания ТК отклика более корректно применять широкий пробный пучок от дополнительного лазера.

1.2. Предложена схема проецирования пучка ТК отклика, при которой на одном экране одновременно наблюдаются ТК отклики для двух разноудаленных от жидкого слоя сечений пучка отклика. Такая схема позволяет перейти от диаметра ТК отклика к более информативной характеристике пучка отклика – его расходимости, по которой можно определить максимальный уклон поверхности и радиус окружности перегиба ТК углубления.

2. Разработан простой и точный фотоабсорбционный метод измерения глубины (в том числе в динамике) ТК прогиба, индуцируемого в слое поглощающей излучение жидкости.

3. Впервые экспериментально исследован процесс развития и релаксации ТК углубления и отклика. Установлено, что:

3.1. Во всех рассмотренных системах ПСП эволюционные зависимости глубины и радиуса линии перегиба ТК углубления, а также расходимости пучка ТК отклика качественно схожи и аппроксимируются логарифмическими функциями;

3.2. Скорость развития глубины ТК прогиба и расходимости пучка отклика, а также их стационарные значения растут пропорционально интенсивности индуцирующей конвекцию пучка и / или показателю поглощения жидкости, и снижаются пропорционально вязкости жидкости и / или толщине ее слоя.

3.3. Повышение теплопроводности подложки приводит к росту радиуса r_i окружности перегиба углубления. Влияние теплового поля подложки особенно выражено для прозрачной жидкости на поглощающей высокотеплопроводной подложке, когда радиус r_i растет пропорционально мощности пучка и может в несколько раз превышать радиус индуцирующего углубление пучка;

3.4. При релаксации углубления, благодаря центростремительным придонным течениям, наведенный источник тепла в подложке при остывании не только не «расплывается», но, напротив, сжимается. Такое поведение источника тепла наиболее заметно в случае высокотеплопроводной подложки, когда в процессе релаксации радиус окружности перегиба углубления сжимается в несколько раз.

4. Обнаружены и объяснены эффекты:

4.1. Увеличение глубины ТК прогиба с повышением коэффициента поглощения жидкости, сопровождающееся сокращением радиуса окружности перегиба ТК углубления.

4.2. Изменения формы и распределения интенсивности ТК отклика в случае клиновидного жидкого слоя.

5. Предложен ряд приложений ФТК эффекта.

5.1. Бесконтактный метод измерения толщины (с точностью до 1 мкм) тонких жидких слоев по диаметру стационарного ТК отклика;

5.2. Метод контроля горизонтальности поверхности по распределению интенсивности стационарного ТК отклика. Этот метод позволяет регистрировать уклон поверхности $\sim 0.0002^\circ$.

5.3. Бесконтактные методы измерения вязкости жидкости: а) по распределению интенсивности стационарного ТК отклика при клиновидном жидком слое; б) по динамике развития ТК отклика.

5.4. Методы измерения энергетических параметров лазерного пучка: а) мощности по диаметру стационарного ТК отклика (в диапазоне 0.1...450 мВт имеет погрешность не выше 3 %); б) мощности пучка по динамике развития ТК отклика; в) энергии одиночных лазерных импульсов по максимальному диаметру достигаемому ТК откликом.

5.5. Метод изготовления зеркал-трансформаторов распределения интенсивности лазерного пучка путем индуцирования в слое фотополимера ТК углубления и полимеризации слоя вспышкой УФ излучения по достижению требуемых оптических характеристик углубления.

5.6. Метод удаления с твердых поверхностей капель и пленок смачивания, при котором разрыв жидкой пленки и управляемое течение жидкости происходит за счет индуцируемых пучком света сил термокапиллярной природы.

ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

1. 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 – 370 с.

2. 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 – 414 с.

3. 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.
4. 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.
5. 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. – Москва, СИП РИА, 2000 – 360 с.
6. Патент РФ № 2161322. Зеркало-трансформатор гауссова светового пучка в пучок с заданным по радиальному закону распределением интенсивности, и способ его изготовления с параметрами контролируруемыми в процессе изготовления / Безуглый Б.А., Тарасов О.А., Федорец А.А. Бюл. № 36, 2000.
7. Патент РФ № 2158898. Способ бесконтактного контроля плоскостности поверхности / Безуглый Б.А., Тарасов О.А., Федорец А.А. Бюл. № 31, 2000.
8. Патент РФ № 2163712. Способ измерения и контроля мощности лазерного излучения и устройство для его осуществления / Безуглый Б.А., Федорец А.А. Бюл. № 6, 2001.
9. Патент РФ № 2165073. Способ контроля горизонтальности поверхности / Безуглый Б.А., Федорец А.А. Бюл. № 10, 2001.
10. Патент РФ № 2165071. Способ измерения толщины тонкого слоя прозрачной жидкости / Безуглый Б.А., Федорец А.А. Бюл. № 10, 2001.
11. Патент РФ № 2169049. Способ очистки твердой поверхности от жидких загрязнений в виде пленки смачивания или капель / Безуглый Б.А., Федорец А.А. Бюл. № 17, 2001.
12. 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, 2002.

13. Патент РФ № 2178155. Способ измерения мощности лазерного пучка и энергии лазерного импульса / Безуглый Б.А., Федорец А.А. Бюл. № 1, 2002.

14. Заявка на изобретение №2001106544/28(006717). Бесконтактный способ измерения вязкости. Безуглый Б.А., Федорец А.А. Решение о выдаче патента РФ от 27.06.02.

15. 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 – 116 p.

16. 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.

17. Безуглый Б.А., Тарасов О.А., Федорец А.А. Усовершенствованный метод наклонной пластинки измерения краевого угла смачивания // Коллоидный журнал. – 2001. – № 6. – С.735–741.

18. 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 // ВИНТИ, № 02.200.1 07533, 2001. – 62 с.

19. URL: <http://library.intra.ru> 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, 2002.

20. Безуглый Б.А., Федорец А.А., Тарасов, Чаппаров Ф.Х. Применение индуцированной лазерным излучением термокапиллярной конвекции для диагностики жидкостей и их слоев, контроля и преобразования параметров лазерных пучков. – Отчет о НИР // ВИНТИ, № ГР 01.200.20 0837, 2002. – 58 с.

Соискатель



А.А. Федорец