

УДК 532.68

## ФОТОИНДУЦИРОВАННАЯ КАПИЛЛЯРНАЯ КОНВЕКЦИЯ: НОВЫЙ ПОДХОД К ЛАЗЕРНОЙ ДИАГНОСТИКЕ В ТЕПЛОФИЗИКЕ

Б.А. Безуглый

*Лаборатория жидкостных микрогравитационных технологий  
Тюменский госуниверситет, Тюмень, Россия*

*Доклад посвящен явлению фотоиндуцированной капиллярной конвекции и разработанному на его основе фототермокапиллярному методу исследования теплофизических свойств твердых материалов. Этот метод может быть эффективно использован для диагностики приповерхностных дефектов в виде трещин, инородных включений, а также для измерения толщины лагорасочных покрытий.*

**1. Капиллярные явления** – целый класс явлений, связанных с самопроизвольным движением жидкости в приповерхностной области, вызванной отклонением ее поверхности раздела фаз (ПРФ) от состояния равновесия. Это состояние определяется двумя факторами: 1) *геометрическим* – равновесным значением ее кривизны  $\kappa$ , и 2) *динамическим* – равновесным значением ее поверхностного натяжения (ПН),  $\sigma$ . Отклонение какого-либо из них (или же обоих одновременно) приводит капиллярную систему, через тензор напряжений, в движение к направлению равновесия.

$$p(\sigma, \kappa) = 2\sigma\kappa \Rightarrow \delta p = 2\sigma\delta\kappa + 2\kappa\delta\sigma \quad (1)$$

где  $p$  капиллярное (лапласово) давление. Рассмотрим каждый случай в отдельности.

(1) *Неоднородность кривизны поверхности.* Если по каким-то причинам равновесная поверхность жидкости была деформирована, то под ней возникнет перепад давлений, пропорциональный кривизне деформации. Этот перепад породит поле скоростей, которое перераспределяет жидкость в приповерхностной деформированной области так, чтобы поверхность имела равновесное значение ее кривизны. В отсутствие массопереноса через ПРФ движение жидкости имеет переходный характер, то есть прекращается после того, как ПРФ примет равновесную форму. Однако, если жидкость является летучей, как например рабочее тело в тепловой трубке, то ее постоянное испарение с поверхности мениска в поре фитиля поддерживает его форму неравновесной и, следовательно, создает перепад давления под ним, как движущую силу (то есть, подсос).

(2) *Неоднородность поверхностного натяжения.* В самом общем случае ПН зависит как от температуры  $T$ , так и от концентрации  $C$  компонентов жидкости:

$$d\sigma(T, C) = \frac{\partial\sigma}{\partial T}dT + \frac{\partial\sigma}{\partial C}dC \quad (2)$$

В случае отклонения ПН от равновесного значения, его градиент отличен от нуля:

$$\frac{d\sigma(T, C)}{dr} = \frac{\partial\sigma}{\partial T} \frac{dT}{dr} + \frac{\partial\sigma}{\partial C} \frac{dC}{dr} \neq 0 \quad (3)$$

Внимательный анализ простого выражения (3) позволяет открыть теоретически именно то явление, которому посвящен данный доклад. Вместо умозрительных рассуждений, рассмотрим реальную ситуацию. Возьмем тонкий слой раствора детергента в воде в широком сосуде (напр., на подносе) и приблизим к его поверхности острое пламя газовой горелки, рис.1. Из-за локального нагрева, органические молекулы испаряются, освобождая поверхность воды, которая даже при температуре близкой к точке кипения

имеет достаточно высокое ПН ( $\sim 59 - 60$  мН/м). Как известно, детергенты являются ПАВ'ами, понижающими ПН воды до 24 мН/м. Таким образом, между зоной касания пламени и холодной окрестностью слоя существует перепад поверхностного натяжения не менее 25 мН/м, который поддерживает высокую скорость течения поверхностного слоя в зону действия горелки. В конечном счете, нижележащие слои раствора за счет вязкости также вовлекаются в движение к центру пламени и под ним возникает деформация в виде соска. Этот вид течения по аналогии с известным термокапиллярным (ТК) можно назвать концентрационнокапиллярным (КК).

**2. История капиллярных явлений.** Эффект «слезы крепкого вина», который упоминается еще в Библии [1], также объясняется действием КК механизма. Этот же механизм лежит в основе таких классических капиллярных эффектов, как успокоение волнения с помощью масла [2], «танец камфары» [3], и «апельсиновая кожура» в живописи маслом [4].

В случае однокомпонентных жидкостей возможно действие лишь одного ТК механизма. Однако, именно ТК конвекцию заметить оказалось намного труднее, по той простой причине, что вода, самая распространенная жидкость, имеет аномально высокое ПН и многие органические примеси по отношению к ней являются ПАВ'ами. Накапливаясь на ее свободной поверхности, они подавляют всякие попытки поверхностного движения. Наличием следов органических примесей в воде объясняется известный парадокс всплывающих пузырьков Рыбчинского-Адамара [5, 6]. Лишь в 1939 Хершей по предложению И. Ленгмюра выполнил простой опыт, в котором впервые продемонстрировал ТК эффект в тонком слое воды на предметном стекле микроскопа [7].

На пороге прошлого века французский физик Анри Бенар в опытах с тонкими слоями расплавленного спермацета заметил образование удивительно правильных конвективных картин гексагональных ячеек [8, 9]. В его публикациях можно найти, по крайней мере, два указания на поверхностные силы как наиболее вероятную причину явления. Однако, высказанные предположения не были дальше развиты ни автором, ни его последователями. Спустя 16 лет Рэлей показал теоретически, что нагреваемый снизу слой вязкой жидкости при достижении некоторого критического перепада температур становится неустойчивым и в нем самопроизвольно развивается конвекция, которая приводит к образованию упорядоченной картины конвективных ячеек [10]. Теория плавучести Рэлей показала на первый взгляд вполне убедительной моделью ячеек Бенара и несмотря на сомнения, время от времени возникавшие у некоторых исследователей, просуществовала до 1956, когда М. Блок экспериментально показал, что ячейки Бенара могут возникать и в перевернутом слое, когда более легкая нагретая от подложки жидкость находится выше, более тяжелой, остывающей у свободной поверхности слоя [11]. Спустя два года появилась теория термокапиллярной неустойчивости [12]. Окончательный ответ на вопрос о роли поверхностных сил в образовании ячеек Бенара могли дать лишь опыты в условиях невесомости. В начале 1971, на борту Apollo-14, при возвращении с Луны, где-то на полпути, были выполнены опыты по наблюдению образования ячеек Бенара в тонком слое силиконового масла [13]. Из-за трудно предвидимой ошибки в подготовке эксперимента, результаты первых опытов оказались неубедительными, и их пришлось повторить на борту Apollo-17 в конце 1972 [14].

**3. Явление фотоиндуцированной капиллярной конвекции (ФИКК)** открыто в 1975 при поиске молекулярных систем, в которых должен наблюдаться предполагаемый «фотофазовый эффект», то есть, смещение точки фазового равновесия под действием света [15, 16]. Облучая пары йода в запаянной стеклянной ампуле при

температуре свыше  $320\text{ }^{\circ}\text{C}$ , было замечено образование «аномальной» капли, названной так из-за ее необычного поведения:

(1) Капля возникла в центре пучка, где имел место максимальный нагрев поглощающего излучение тела. Помещенная в пучок термopара показывала повышение температуры почти на  $135\text{ }^{\circ}\text{C}$ ; и капля не испарялась, а росла, достигая размера равного диаметру сфокусированного пучка  $\sim 600\text{ }\mu\text{m}$ ;

(2) При модуляции пучка света с частотой вплоть до еще различимой глазом,  $\sim 20\text{ Гц}$ , капля «дышала» с соответствующей частотой, то есть, при перекрывании пучка она растекалась по поверхности кюветы, вследствие уменьшения краевого угла, а при включении пучка капля стягивалась, за счет увеличения краевого угла, и ее видимый диаметр уменьшался;

(3) При перемещении пучка вдоль поверхности кюветы капля неотрывно следовала за пучком, стремясь занять место в его центре. Одновременно с этим, при подходе пучка к границе исходного расплава йода, последняя отступала, рис. 1

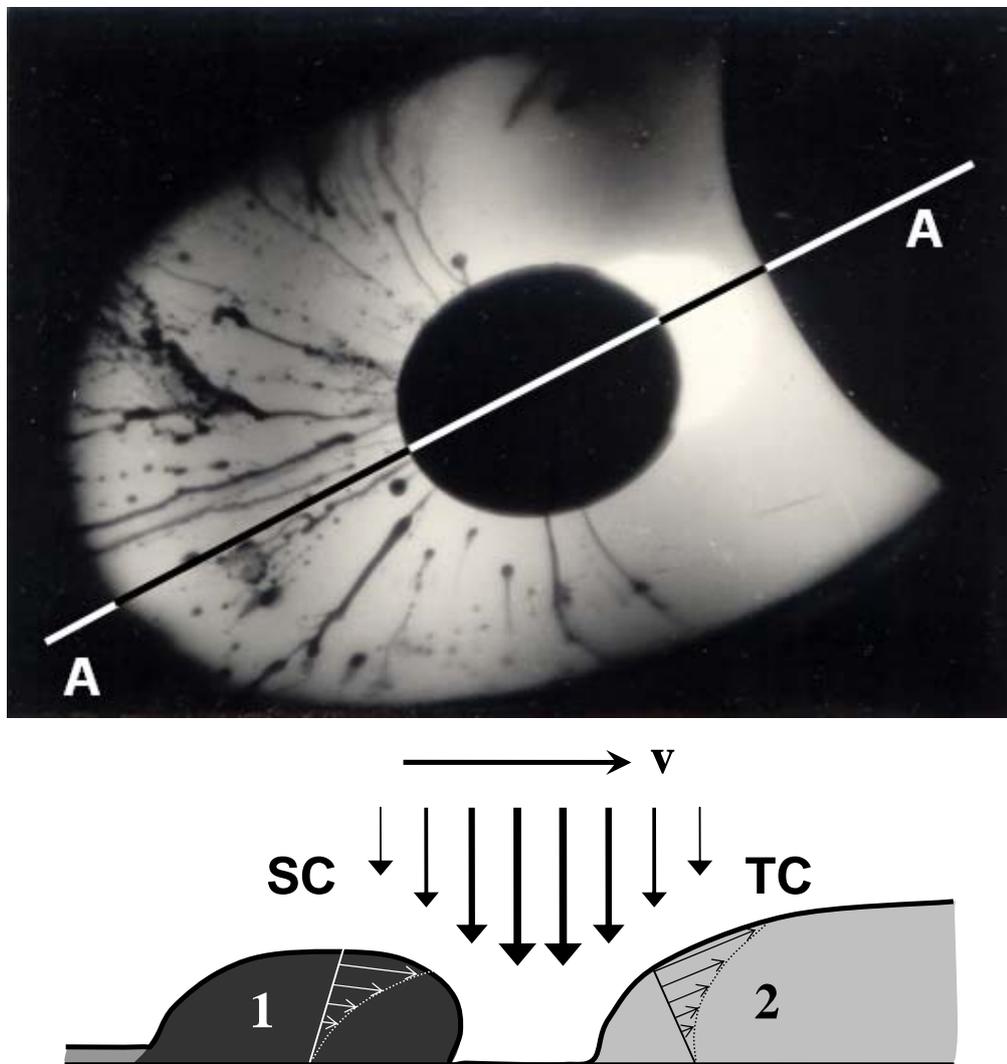


Рис. 1. Движение «аномальной» капли 1 за пучком света и одновременное отступление исходного расплава йода 2 иллюстрирует концентрационнокапиллярный (SC) и термокапиллярный (TC) механизмы явления фотоиндуцированной капиллярной конвекции. Под фотографией показано сечение AA по оси движения капли с указанием направления движения пучка и полями скорости в капле и исходном расплаве.

Приведенная на Рис.1 фотография наглядно иллюстрирует одновременное действие обоих механизмов: слева, движением аномальной капли управляет КК механизм, а справа, отступанием расплава йода управляет ТК механизм. Эти факты обнаружены автором в марте 1975 [16], однако в первых публикациях их адекватное объяснение отсутствовало. Таким образом, в двух- и многокомпонентных смесях (и растворах) можно наблюдать различные капиллярные эффекты, связанные с конкуренцией КК и ТК механизмов.

Поскольку эксперименты были нацелены на поиск подтверждения «фотофазового эффекта», то образование аномальной капли как будто бы подтверждало смещение точки фазового равновесия под действием света и это явление назвали «фотоконденсацией» йода [16]. В следующей работе [17] было доказано, что это явление не связано с фотовозбуждением молекул йода, которое приводит к усилению их взаимодействия, а имеет тепловую природу и связано с наличием примесей, которые накапливаются в расплаве йода вследствие выщелачивания стекла при высокой температуре. Однако, предложенная термодиффузная модель также оказалась ошибочной. Тщательные опыты с модельными системами (раствор йода в броне и ацетоне, а также добавление иодидов натрия и калия в расплав йода) показали, что этот эффект имеет не термодиффузную, а концентрационнокапиллярную природу и наблюдается в тонком слое раствора тензоактивного вещества (ТАВ) в легколетучем растворителе при условии, что повышение поверхностного натяжения раствора с ростом концентрации ТАВ из-за испарения летучего растворителя превышает его снижение из-за нагрева пучком света [18], то есть

$$\sigma_c(\partial c/\partial r) > |\sigma_T(\partial T/\partial r)| \quad (4)$$

Позже установлено [18], что при облучении сфокусированным пучком света тонкого слоя поглощающего раствора нелетучего ТАВ в легколетучем растворителе протекают следующие процессы, которые по их преобладанию во времени и пространстве можно представить в виде стадий-эффектов с момента включения пучка, рис. 2.

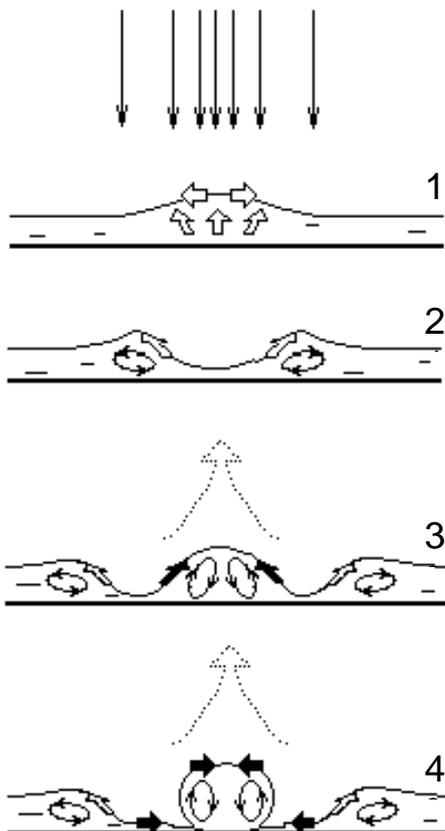


Рис. 2. Основные стадии развития фотоиндуцированной КК конвекции с момента включения пучка.

1) Поднятие свободной поверхности, вызванное тепловым расширением (термоширительная конвекция). Это переходный, быстротечный эффект и в маловязких жидкостях, где ТК поле скорости устанавливается быстро, его наблюдать трудно.

2) Под действием ТК сил жидкость растекается из нагреваемой светом области и образуется углубление. В случае большой мощности пучка и достаточно тонкого слоя углубление может достичь дна и, вследствие высыхания жидкости или ее растекания и плохой смачиваемости поверхности подложки, может произойти разрыв слоя.

3) Если условия подобраны так, что разрыва слоя не происходит и, из-за испарения растворителя, в облучаемой зоне выполняется условие  $\sigma_c(\partial c/\partial r) > |\sigma_T(\partial T/\partial r)|$ , то наступает стадия КК.

4) Дальнейший рост концентрации тензоактивной примеси в зоне облучения вызывает расслоение фаз и образование обособленной капли с описанными выше аномальными свойствами.

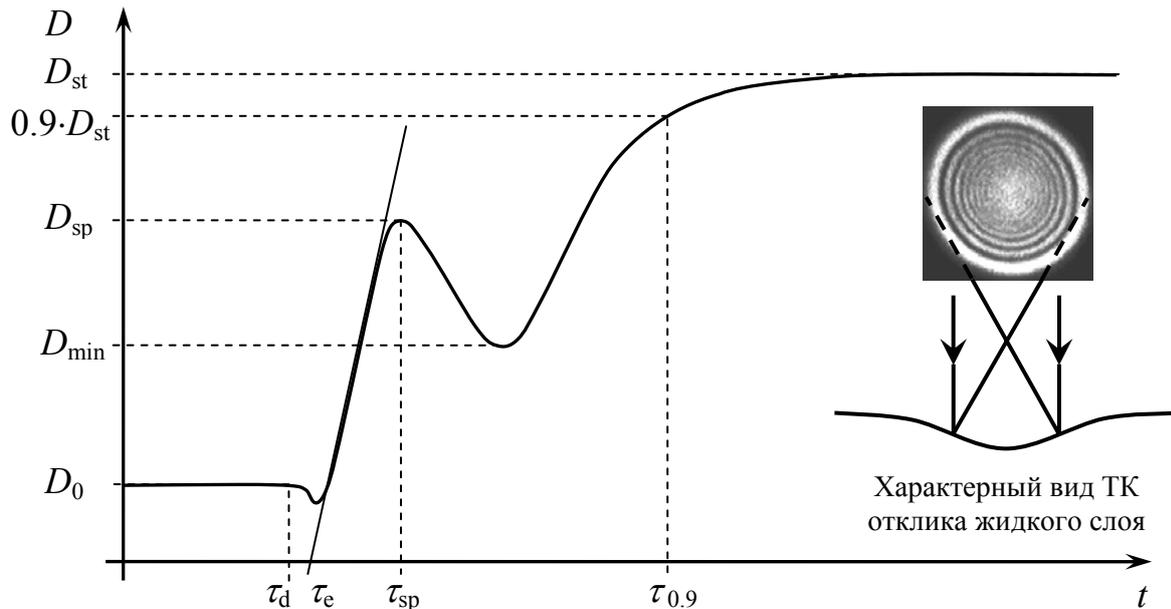


Рис. 3 Схематичное представление ФТК сигнала и его характеристики:  $D_0$  – начальный диаметр ТК отклика,  $D_{min}$  – минимум за всплеском,  $D_{sp}$  – амплитуда всплеска,  $D_{st}$  – стационарный диаметр,  $\tau_d$  – время задержки ТК конвекции,  $\tau_e$  – время эжекции (выброса) накопленной в системе энергии,  $\tau_{sp}$  – время всплеска,  $\tau_{0.9}$  – время достижения значения  $0.9 \cdot D_{st}$ .

В опытах с достаточно толстыми (свыше 50 мкм) слоями модельных систем (раствор бриллиантового зеленого в этаноле), было замечено, что пучок He-Ne лазера, отраженный от образованного при его поглощении ТК углубления, образует на экране круговую картину в виде системы концентрических колец, рис. 3, с самым ярким на периферии и с убывающими яркостью и шириной к центру. Подобная картина опубликована в работе [19]. Всю эволюционную кривую диаметра ТК отклика с момента включения пучка и до выхода на стационар можно назвать фототермокапиллярным (ФТК) сигналом. Эта кривая в надежно контролируемых условиях хорошо воспроизводится и содержит полезную информацию о параметрах системы «пучок – слой жидкости – подложка» (ПСП), Рис. 4.

Тенденция использовать ФТ эффекты для разработки на их основе новых методов исследования оптических и ТФ свойств материалов совершенно естественна: На исследуемый образец со скоростью света бросают известную порцию ЭМ энергии, с хорошо контролируемыми пространственными и временными характеристиками и прослеживают эволюцию этого энергетического возмущения. Эта эволюция отражается в ряде свойств образца, которые зависят от температуры. Поэтому, ФТ методы удобно классифицировать по преобладающему эффекту, который вызван изменением соответствующего свойства, рис. 6.

**4. Новое направление в лазерной диагностике** ориентируется на современные скоростные приборы, позволяющие обрабатывать большие массивы видеoinформации, которая поступает на вход приемников изображения в виде картины распределения интенсивности преломленного, и/или отраженного от образца пробного пучка лазера. Основой любого ФТК способа является система ПСП. Сведения о результате теплового действия света на жидкий слой получают с помощью пробного пучка, который, отразившись от ТК углубления, дает на экране интерференционную картину – ТК отклик [18]. Диаметр отклика, его форма, и распределение в нем интенсивности, зависят от ряда параметров системы ПСП:

$$D = f \left( \underbrace{P, w, \lambda}_{\text{пучок}}; \underbrace{a, \sigma, \sigma_T, \eta, \rho, k, c_p, h, h_x}_{\text{слой жидкости}}; \underbrace{a_s, k_s, \rho_s, c_{ps}, h_s}_{\text{подложка}} \right) \quad (5)$$

Включение в анализ двухкомпонентных и летучих жидкостей увеличит число параметров еще на два:  $\sigma_c = \partial\sigma/\partial c$ , поверхностная активность; и  $p$ , давление насыщенного пара.

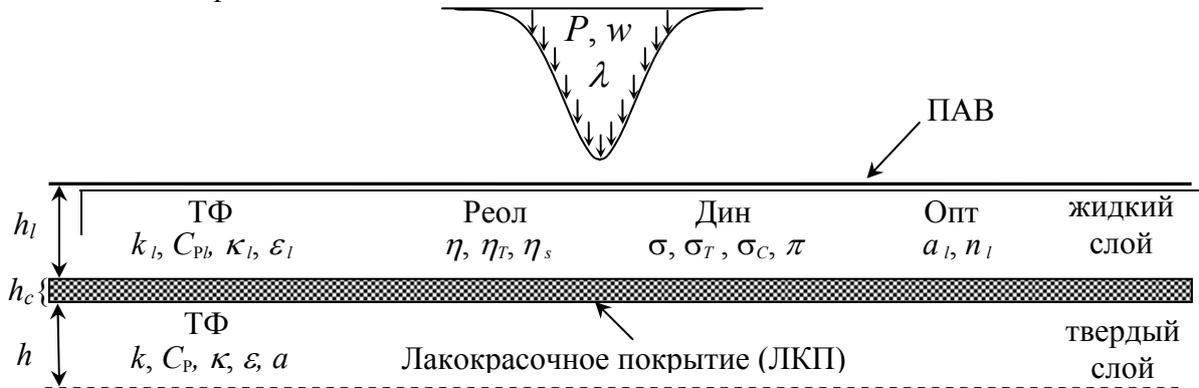


Рис. 4 Параметры системы ПСП: ТФ – теплофизические, Реол – реологические, Дин – динамические и Опт – оптические свойства; ПАВ – поверхностно-активное вещество.  $k$  – теплопроводность,  $\kappa$  – температуропроводность,  $C_p$  – теплоемкость,  $\varepsilon$  – термоэффузивность,  $\eta$  – вязкость,  $\eta_T \equiv \partial\eta/\partial T$ ,  $\sigma$  – поверхностное натяжение,  $\sigma_T \equiv \partial\sigma/\partial T$ ,  $\pi$  – поверхностное давление 2D газа,  $a = c\varepsilon$  – коэффициент поглощения,  $c$  – концентрация поглощающего вещества,  $\varepsilon$  – его удельный коэффициент поглощения,  $n$  – показатель преломления,  $h_l$  – толщина слоя жидкости,  $h_c$  – толщина ЛКП,  $h$  – толщина подложки. Индексы:  $l$  – жидкость,  $s$  – её поверхность,  $c$  – слой ЛКП.

На форму ТК отклика влияет смачиваемость боковых границ кюветы, если они находятся от точки падения пучка накачки на слой на расстоянии меньше значения  $d_\infty$ , начиная с которого кривизной их мениска, простирающегося к точке падения пучка на слой, пренебречь нельзя. В этом случае имеет место аддитивность статической кривизны мениска и динамической кривизны ТК углубления [18]. Кроме того, установлено, что геометрия подложки (например, подложка- брусок) также влияет на форму ТК отклика, который вместо круга принимает вид эллипса.

Чтобы оценить степень влияния боковых границ на форму ТК отклика, можно ввести аспект-отношение  $A = d/d_\infty$ , где  $d$  расстояние между двумя боковыми границами,  $d_\infty$  расстояние, начиная с которого можно пренебречь кривизной мениска боковых стенок. Точно также для оценки степени влияния геометрии подложки, очевидно, следует ввести подходящий параметр, например, отношение ширины бруска  $a$  к его высоте  $b$ .

Таким образом, число параметров системы ПСП, от которых в той или иной степени зависит диаметр ТК отклика и его форма, может превысить два десятка. Тем не менее, эта столь многопараметрическая зависимость диаметра и формы ТК отклика является большим преимуществом ФТК эффекта как основы для разработки способов измерения почти всех параметров, описывающих систему ПСП. На сегодняшний день экспериментально подтверждены: способ измерения мощности пучка лазера [20], несколько способов бесконтактного измерения вязкости жидкости [21], толщины капиллярного слоя жидкости [22], его плоскостности [23], а также способ измерения теплопроводности твердого материала [24, 25]. Используя ФТК эффект, можно измерить практически любой параметр, указанный в (5). С этой целью все параметры фиксируют, кроме искомого. По набору эталонных образцов с известными значениями

этого параметра, строят калибровочный график зависимости диаметра ТК отклика от параметра исследуемого образца. (жидкость, твердое тело).

Проверку возможности разработки способа определения какого-либо параметра, из указанных в (5), следует начинать с анализа возможности фиксирования (или контроля) всех других параметров, кроме измеряемого.

(1) Фиксирование параметров пучка лазера – наиболее простая задача, что и определило его как наиболее удобный источник энергии для диагностических целей. Нестабильность частоты (длины волны,  $\lambda$ ) излучения современных лазеров столь мала, что практически не отражается на его фототермическом воздействии на жидкость или подложку. Ширина пучка  $w$  и его мощность  $P$  также весьма устойчивые параметры.

(2) Все параметры подложки (в основном, теплофизические) в процессе эксперимента при постоянной температуре также остаются неизменными.

(3) Возникает серьезный вопрос фиксирования параметров жидкости и геометрии ее слоя (то есть, толщины  $h$  и неплоскостности  $h_x = \partial h / \partial x$ ). Контроль горизонтальности слоя и его толщины в случае маловязких, нелетучих жидкостей не представляет труда. Замечательным свойством большинства жидкостей является то, что они прозрачны для излучения лазеров в диапазоне от 500 до 700 нм.

**6. Оптические схемы накачки и считывания.** Анализ схем возбуждения ФТК эффекта уместно начать с двух предельных случаев оптических свойств жидкости и поверхности подложки: (1) слой сильно поглощающей жидкости на твердой подложке и (2) слой прозрачной жидкости на поглощающей подложке. Второй случай можно свести к первому добавляя в жидкость поглощающий краситель. Если концентрация красителя в жидкости настолько велика, что излучение накачки поглощается в ее приповерхностном слое  $\delta_a \ll h$  (на практике, при исследовании слоев толщиной  $h \geq 50$  мкм достаточно, чтобы  $\delta_a \leq 10$  мкм), то исследуемый слой жидкости называют *оптически толстым*. Тогда, оптические свойства подложки не оказывают никакого влияния на развитие эффекта ФИКК, при условии, что мощность пучка накачки меньше некой критической  $P_r$  (rupture = разрыва), которая приводит к образованию столь глубокого ТК углубления, когда расстояние его дна до поверхности подложки становится близким к  $\delta_a$ . В этом случае излучение накачки начинает проникать через придонный участок слоя к поверхности подложки и будет поглощаться, если эта поверхность черная, или отражаться, если она зеркальная. Таким образом, дальнейшее развитие ТКК может пойти по разным сценариям. При этой мощности чаще всего происходит ТК разрыв слоя. Разумеется,  $P_r$  зависит от начальной толщины слоя и начиная с некоторого значения  $h_\infty$  разрыв слоя не может произойти ни при какой мощности пучка, при условии, что вскипание исключается.

Между этими двумя предельными случаями сильно поглощающей и прозрачной жидкости имеется непрерывный ряд промежуточных случаев частично поглощающей жидкости, когда часть излучения проходит через слой такой жидкости и его называют *оптически тонким*. Тогда оптические свойства подложки начинают влиять на развитие ФИКК и с учетом этого влияния подложки возможны различные оптические схемы возбуждения ФИКК и считывания полезной информации, содержащейся как в отраженном пробном, так и в прошедшем возбуждающем пучках, рис. 5. Здесь, ради краткости, предлагается следующий способ обозначения всевозможных схем. Название схемы состоит из первых букв от прилагательных, определяющих оптические свойства ее основных компонент «сверху вниз»: В (Beam) пучок накачки, слой жидкости и подложка, где А (Absorbing) поглощающий, Р (Partial) частично поглощающий, Т (Transparent) прозрачный, М (Mirror) зеркальный. Таким образом, кроме двух предельных схем ВАА и ВТА имеем еще четыре промежуточные схемы: ВРА, ВРТ, РТВ, ВРМ. Рассмотрим вкратце каждую из этих схем.

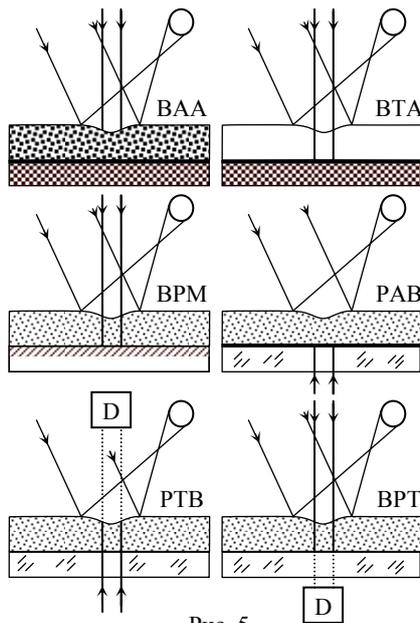


Рис. 5.

**ВАА.** Применение этой схемы ограничено сильно поглощающими жидкостями и представляет интерес лишь с точки зрения модельных экспериментов для тестирования вычислительных экспериментов. В настоящее время в лаборатории начаты исследования применимости такой схемы для разработки нового метода определения ТФ свойств твердых тел. Предварительные результаты, полученные свыше 30 лет тому назад [18] вселяют некоторую надежду на успех в этом направлении.

**ВТА.** Прозрачная жидкость и хорошо поглощающая подложка. В этом случае наблюдается эффект задержки и всплеск ТК отклика. Благодаря информативно богатой эволюционной кривой, рис. 3, на основе этой схемы разработан сверхчувствительный способ обнаружения следовых количеств ПАВ в воде [26], а также разрабатываются способы определения ТФ свойств твердых тел [24,25].

**РАВ.** Эта схема полностью тождественна схеме ВТА, но существенно расширяет диапазон исследуемых жидкостей от полностью прозрачных, до непрозрачных.

**ВРТ** и **РТВ.** Позволяют извлекать дополнительную информацию из частично проходящего через слой пучка накачки. В момент его включения возможен замер поглощения слоя на длине волны накачки. Далее, в процессе развития ТК углубления возможна регистрация эволюции его профиля или, по крайней мере, эволюции его глубины. Такие схемы эффективны для исследования свойств частично поглощающих жидкостей, включая нефти. При оптически тонком слое обе схемы становятся практически идентичными. В предельном случае сильно поглощающей жидкости схема ВРТ вырождается в схему ВАА, а схема РТВ – в схему РАВ.

Особый интерес представляет схема **ВРМ** с зеркально отражающей поверхностью подложки, как например, ртутное зеркало. Тогда при слабо поглощающей жидкости можно наблюдать интерференционную картину, возникающую в центральной части ТК углубления. По этой картине можно восстановить профиль ТК углубления [18]. В случае сильно поглощающей жидкости схема ВРМ вырождается в схему ВАА. Однако, в случае слабо поглощающих жидкостей, пучок накачки благодаря удвоению его пути в слое за счет отражения от дна, поглощается более эффективно. Увеличивая его мощность, можно повысить чувствительность схемы к поглощающей примеси в исследуемой жидкости, и таким образом схема становится пригодной для спектроскопических исследований [27].

Судя по графику, рис. 3, можно предположить, что его нестационарные характеристики, проявляющиеся до выхода на стационар, должны коррелировать с нестационарными ТФ параметрами как жидкости, так и подложки. Мы обнаружили воспроизводимую зависимость времени эжекции,  $\tau_e$ , с тепловой активностью,  $\varepsilon$ , материала подложки. В настоящее время в лаборатории продолжается поиск минимального набора информативных характеристик эволюционной кривой ТК отклика и их связи с ТФ параметрами системы ПСП.

**7. Фототермические эффекты и методы.** Чтобы оценить достоинства ФТК метода и его возможности, рассмотрим бегло все известные ФТ эффекты и основанные на них методы исследования оптических и теплофизических свойств, рис. 6. В литературе часто подчеркивается их бесконтактность и неинвазивность. Однако, в большинстве этих методов по разным причинам требуется контактная среда. Метод

PAS в вакууме просто неосуществим, если не привести в контакт с образцом пьезодатчик. В мираж-методе для получения стабильного  $d$ -сигнала (сигнала отклонения – *deflection*) исследуемый образец помещают под слой жидкости с высоким термооптическим коэффициентом и низкой теплопроводностью. Метод PTC заведомо контактный, так как требует теплового контакта образца с датчиком температуры. В последние годы стала популярной фотопирозлектрическая (PPE) калориметрия, где используют пирозлектрические пленки толщиной менее 10 мкм. В методе PTR при применении его в неразрушающем контроле требуется покрывать поверхность испытуемого изделия тонким равномерным слоем черной краски, чтобы исключить неоднородность излучательной способности его поверхности.

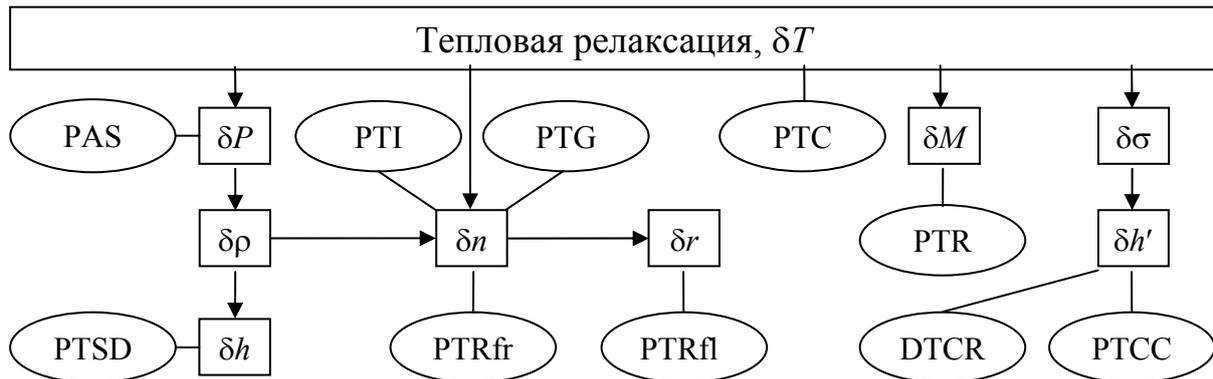


Рис.:6. Основные фототермические эффекты и методы.  $T$  – температура;  $P$  – давление,  $\rho$  – плотность,  $h$  – толщина,  $n$  – показатель преломления,  $r$  – коэффициент отражения,  $M$  – энергетическая светимость;  $\sigma$  - поверхностное натяжение; PAS – фотоакустическая спектроскопия; PTSD – ФТ деформация поверхности; PTI – ФТ интерферометрия; PTG – метод импульсной динамической решетки; PTRfr – фототермическая рефракция; PTRfl – ФТ рефлектанс; PTC ФТ калориметрия, включая пирозлектрическое детектирование; PTR – ФТ радиометрия; DTGR – эффект задержки ТК отклика; PTCC – фототермокапиллярная конвекция.

Таким образом, использование в ФТК методе тонкого слоя силиконового масла в качестве датчика сигнала не следует считать основным недостатком, по сравнению с другими ФТ методами. Более того, как видно из приведенных на Рис. 5 оптических схем накачки и считывания, ФТК метод изначально развивался как метод лазерной диагностики жидкостей, особенно для бесконтактной вискозиметрии, где свободная поверхность исследуемой жидкости является датчиком ФТК сигнала. Несомненно, в процессе дальнейших исследований явления ФИКК будут найдены новые, неожиданные его применения.

Автор благодарит аспиранта Семенова С.В. за существенную техническую помощь при подготовке доклада.

### Ссылки

1. Библия. Притчи, 23.31; Loewenthal M. Tears of strong wine. *Phil. Mag.*, Ser.7, **12** 462 (1931)
2. Aitken J. On the effect of oil on stormy sea. *Proc. Roy. Soc., Edin.*, **XII**, 56 (1882/83)
3. Tomlinson Ch. On the motion of camphor and of certain liquids on the surface of water. *Phil. Mag. Ser.4* **46** 376-388 (Nov.1873)
4. Berg J.C., Acrivos A., Boudart M. Evaporative convection. *Adv. Chem. Eng.* **6**, 61-123 (1966)
5. Rybczynski W. Uber die fortshreitende bewegung einer flussigen kugel in einem zahen medium. *Bull. Acad. Sci. Cracovie* **1**, 40-46 (1911)

6. Hadamar J. Movement permanent lent d'une sphere liquide et visqueuse dans un liquide visqueux. *Compt. Rend. Acad. Sci., Paris*, **152** 1735-1738 (1911)
7. Hershey A.V. Ridges in a liquid surface due to the temperature dependence of surface tension. *Phys. Rev.* **56**, 204 (1939)
8. Benard H. Les tourbillons cellulaires dans une nappe liquide. *Rev. generales Sci. pures et appliquees.* **11**, 1261-71, 1309-1328 (1900)
9. Benard H. Les tourbillons cellulaires dans une nappe liquide transportant de la chaleur par convection en regime permanent. *Ann. Chim. Phys., Ser. 7*, **23**, 62-144 (1901)
10. Rayleigh, Lord. On convection currents in a horizontal layer of fluid, when the higher temperature is on the under side. *Phil. Mag. Ser. 6*, **32**(192) 529-546 (1916)
11. Block M.J. Surface tension as the cause of Benard cells and surface deformations in a liquid film. *Nature*, **178**, 650 (1956)
12. Pearson J.R.A. On convection cells induced by surface tension. *J. Fluid Mech.* **4**(5) 489-500 (1958)
13. Grodzka P.G., Bannister T.C. Heat flow and convection demonstration experiments aboard Apollo 14. *Science* **176**(4034) 506-508 (1972)
14. Grodzka P.G., Bannister T.C. Heat flow and convection experiments aboard Apollo 17. *Science* **187**(4172) 165-67 (1975)
15. Галашин Е.А. Влияние электронных возбуждений на фазовые переходы и фазовые равновесия. *ДАН*, **198** (6), 1360-1363 (1971)
16. Безуглый Б.А., Галашин Е.А., Дудкин Г.Я. О фотоконденсации йода. *Письма в ЖЭТФ*, **22**(2) 76-9 (1975)
17. Безуглый Б.А., Галашин Е.А., Криндач Д.П., Майоров В.С. Разделение примесей в жидкости при тепловом действии лазерного излучения. *Письма в ЖТФ*, **2**(18) 832-838 (1976)
18. Безуглый Б.А. Капиллярная конвекция, управляемая тепловым действием света и ее применение в способах регистрации информации: Дисс. ... к.ф.-м.н. МГУ, М.: 1983
19. Da Costa G., Calatroni J. Self-holograms of laser induced surface depression in heavy hydrocarbons. *Appl. Opt.* **17**(15) 2381-5 (1978)
20. Безуглый Б.А., Федорец А.А. Способ измерения и контроля мощности лазерного излучения и устройство для его осуществления. Патент РФ № 2163712. Бюл. № 6 // Изобретения. – 2001
21. Безуглый Б.А., Федорец А.А. Бесконтактный способ измерения вязкости. Патент РФ № 2201587. Бюл. № 9 // Изобретения – 2003
22. Безуглый Б.А., Тарасов О.А., Федорец А.А., Шепеленок С.В. Способ измерения толщины тонкого слоя прозрачной жидкости. Патент РФ № 2149353. Бюл. № 14 // Изобретения. – 2000.
23. Безуглый Б.А., Федорец А.А. Способ контроля горизонтальности поверхности. Патент РФ № 2165073. Бюл. № 10 // Изобретения. – 2001
24. Безуглый Б.А., Чемоданов С.И., Зыков А.Ю. Фотоиндуцированная капиллярная конвекция: применения в теплофизике. *Труды РНКТ-4*, Том 3, 51-54 (2006)
25. Безуглый Б.А., Зыков А.Ю. Зависимость ТК отклика слоя прозрачной жидкости от теплопроводности подложки. *Труды ОМИП-2007*, 480-483 (2007)
26. В.А. Bezuglyi., S.I. Chemodanov, O.A. Tarasov. New approach to diagnostics of organic impurities in water. *Colloids and Surfaces A: Physicochem. Eng. Aspects.* **239** 11-17 (2004).
27. Тарасов О.А. Оценка возможности использования лазерно-индуцированного ТК эффекта для ФТ спектроскопии *Оптика и спектроскопия.* **99** (6) 1004-1011 (2005)