

03;07;11;12

## Эффект задержки термокапиллярного отклика слоя прозрачной жидкости при лазерном нагреве поглощающей подложки

© Б.А. Безуглый, С.И. Чемоданов

Тюменский государственный университет,  
625003 Тюмень, Россия  
e-mail: bezuglyi@utmn.ru

(Поступило в Редакцию 4 октября 2004 г. В окончательной редакции 25 января 2005 г.)

Обнаружен эффект задержки термокапиллярного отклика прозрачного слоя жидкости на поглощающей подложке при ее нагреве пучком лазера. Отклик представляет собой интерференционную картину, образуемую отраженным от термокапиллярного углубления пучком на экране, помещенном в его сечении. Установлено, что при использовании возбуждающего пучка He-Ne лазера ( $\lambda = 633 \text{ nm}$ ) мощностью  $20.9 \text{ mW}$  время задержки отклика тонкого ( $h < 1.8 \text{ mm}$ ) слоя жидкости в диапазоне вязкости  $3\text{--}6 \text{ mPa} \cdot \text{s}$  пропорционально квадрату толщины слоя с коэффициентом пропорциональности, зависящим от вязкости и температуропроводности жидкости.

До недавнего времени большинство исследований фотоиндуцированной термокапиллярной (ТК) конвекции проводили в слоях сильно поглощающих жидкостей толщиной  $h > 2 \text{ mm}$  [1–3]. Для применения этого явления в лазерной диагностике жидкостей [4,5] представляет интерес его изучение в слое  $h < 2 \text{ mm}$  прозрачной жидкости на поглощающей подложке. Здесь мы впервые обнаружили эффект задержки ТК отклика.

Известно [6], что если на подложке, на которой находится слой жидкости, мгновенно создать источник тепла, повышающий ее температуру на  $\Delta T$ , то до жидкой свободной поверхности через время

$$\tau = h^2/4nk \quad (1)$$

дойдет изотерма  $\Delta T e^{-n}$ , где  $k$  — температуропроводность,  $n$  — любое положительное число.

На этой простой идее основан ряд методов измерения температуропроводности твердых тел [6].

Известно также, что жидкостям присуща высокая чувствительность к сдвиговым напряжениям, в том числе и ТК природы. Именно это свойство легло в основу целого ряда жидкослойных систем регистрации информации [7–9].

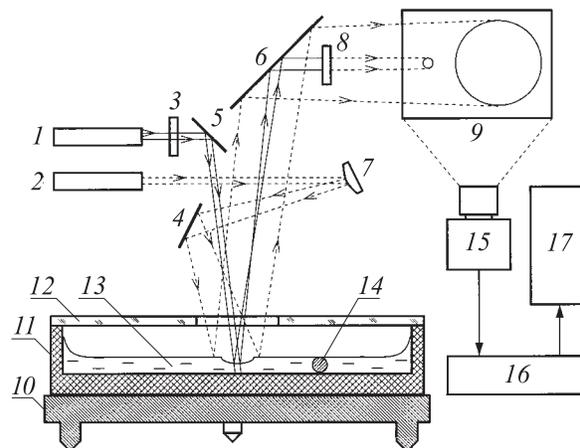
Очевидно, что чувствительность жидкости к сдвиговым напряжениям, характеристикой которой служит число  $n$ , зависит от вязкости  $\mu$ . Величина касательного напряжения

$$-\gamma \frac{\partial T}{\partial r} = \mu \frac{\partial v_r}{\partial z}, \quad (2)$$

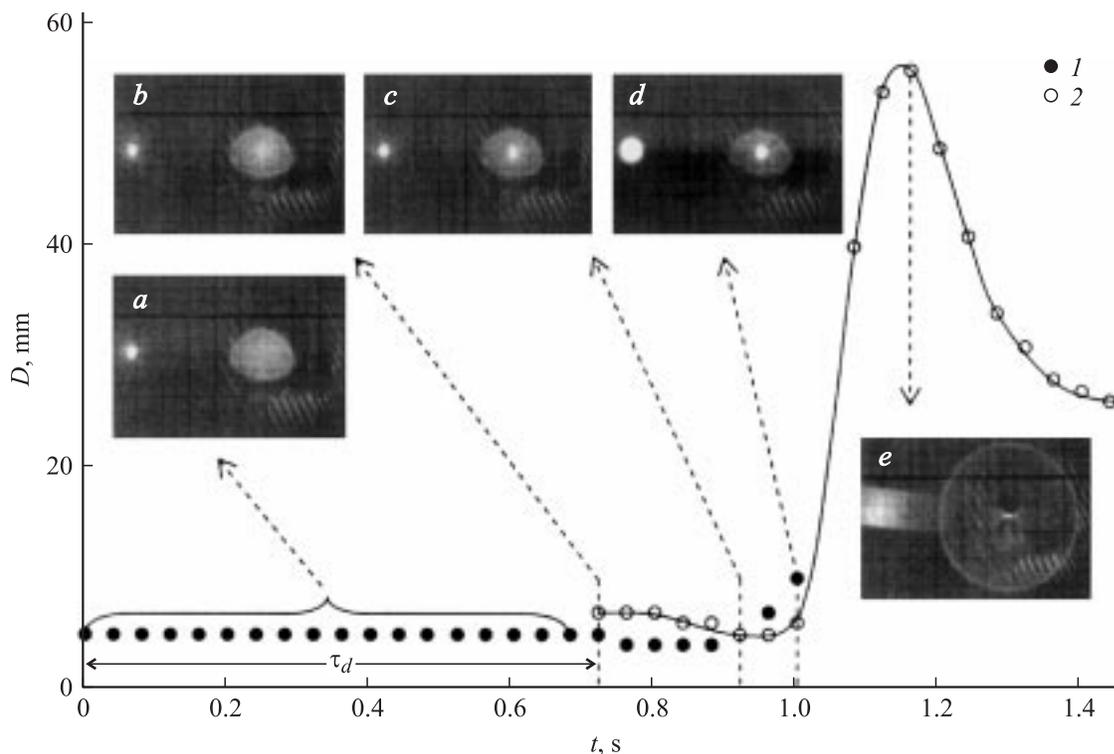
создающего наблюдаемый эффект, будет увеличиваться с ростом вязкости, и наоборот. Здесь  $\gamma$  — термический коэффициент поверхностного натяжения,  $T$  — температура,  $v_r$  — радиальное поле скоростей. Цель данной работы — проверить сам факт существования предполагаемой задержки и выяснить ее зависимость от толщины слоя и вязкости жидкости.

Схема эксперимента показана на рис. 1. Пучок лазера 1 индуцировал ТК конвекцию в слое 13. Поскольку

диаметр возникшей ТК деформации поверхности превосходил диаметр индуцирующего пучка на слое ( $2.5 \text{ mm}$ ), границы ТК отклика были размыты. Для полного охвата зоны деформации свободной поверхности использовали расширенный сферическим зеркалом 7 пробный пучок лазера 2 (диаметр на слое  $10 \text{ mm}$ ), который не вносил заметных возмущений. С помощью зеркал 4–7 установку юстировали так, чтобы на экране 9 в поле зрения видеокамеры 15 находились отклики обоих пучков, ослабляя индуцирующий аттенуатором 8 до яркости пробного. Для выставления заданной толщины слоя использовали



**Рис. 1.** Экспериментальная установка: 1, 2 — He-Ne ( $\lambda = 633 \text{ nm}$ ) одномодовый ЛГ-25-1 (индуцирующий,  $P = 20.9 \text{ mW}$ ) и ЛГН-207а (пробный,  $P = 0.5 \text{ mW}$ ) лазеры; 3 — затвор; 4–6 — зеркала; 7 — сферическое зеркало; 8 — светофильтр; 9 — экран; 10 — микрометрический треножник; 11 — эбонитовая ювета диаметром  $65 \text{ mm}$ ; 12 — стеклянная крышка с отверстием диаметром  $10 \text{ mm}$ ; 13 — слой жидкости; 14 — калиброванная проволока; 15 — CCD видеокамера ACE-S560CH (600 линий, 25 кадров/с) с объективом Гелиос-44; 16 — видеомагнитофон AIWA HV-GX1100; 17 — компьютер Pentium-4 с TV-tuner Aver Media VC-8139.



**Рис. 2.** Эволюция ТК отклика. Индуцирующий (1 слева) и пробный (2 справа) пучки. *a* — отклик; *b* — начало деформации,  $t = \tau_d$ ; *c* — фокусировка пробного пучка; *d* — начало перефокусировки; *e* — всплеск.

калиброванную проволочку 14 [9], а для достижения горизонтальности дна кюветы — микрометрический тrenaжик 10. Характеристики исследованных жидкостей даны в таблице.

Эксперименты проводили при температуре  $21 \pm 1^\circ\text{C}$  следующим образом. В кювету 11 с помощью микропипетки заливали жидкость и закрывали ее стеклянной крышкой 12 с центральным отверстием диаметром 10 мм. Крышка существенно уменьшает испарение и защищает слой от воздействия конвективных токов воздуха. Отверстие обеспечивает доступ к слою для изменения его толщины, не влияя на условия в объеме газовой фазы кюветы, и исключает многократное отражение света от двух поверхностей стекла и поверхности жидкости. После выставления слоя включали видеоматрифон 16 на запись, открывали затвор 3 и записывали динамику развития отклика. По кадрам из

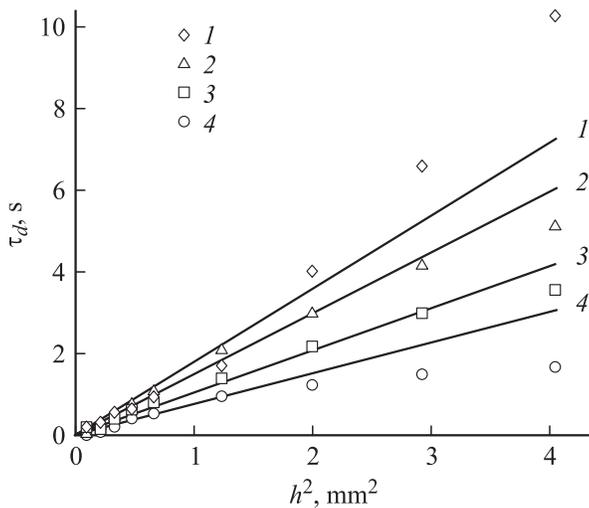
оцифрованного видеопотока определяли диаметр отклика в программе Photoshop.

Между измерениями выдерживали паузу, чтобы система подложка/слой вернулась в исходное состояние. Время воздействия пучка на подложку составляло несколько секунд, а время релаксации системы — несколько минут. Последнее определяли по влиянию паузы между измерениями на результаты экспериментов, а в опытах брали заведомо большую паузу (4–5 минут).

После включения индуцирующего пучка картина пробного в течение некоторого времени не меняется. Эту паузу назовем временем задержки ТК отклика  $\tau_d$ , а отраженный от плоского зеркала жидкости пучок (индуцирующий или пробный) на экране — просто откликом (рис. 2, *a*), тогда как отраженный пучок от уже деформированной ТК конвекцией жидкой поверхности удобно называть ТК откликом (рис. 2, *b–e*). Начало деформации отмечали по отклонению свободной поверхности от плоской, наблюдаемому по появлению в центре пробного пучка светлого пятна (рис. 2, *b*), диаметр которого в момент фокусировки становился минимальным (рис. 2, *c*). Далее, с увеличением глубины деформации происходит рост диаметра как индуцирующего, так и пробного пучка (рис. 2, *d*), который заканчивается всплеском перефокусировки (рис. 2, *e*), что отражается в резком увеличении ТК отклика, с последующим его уменьшением. Причина всплеска состоит в накоплении тепловой энергии в жидком слое до начала конвекции, и его анализ мы здесь опустим.

Физические характеристики жидкостей

Жидкость	Вязкость $\mu$ , мПа · с	Коэффициент объемного расширения $\beta$ , $\text{K}^{-1}$	$\frac{Ra}{gh^3\Delta T} \cdot 10^{-9}$ , $\text{s}^2/\text{m}^4 \cdot \text{K}$	$n$
Этиленгликоль	19.9	0.64	0.36	1.4
Бензиловый спирт	5.8	0.75	1.87	2.6
Бутанол-1	2.95	0.95	3.35	3.1
н-октан	0.546	1.14	15.7	3.5



**Рис. 3.** Зависимость времени задержки ТК отклика от квадрата толщины слоя. Сплошная линия — зависимость  $\tau_d = h^2/4nk$ . 1 — этиленгликоль, 2 — бензиловый спирт, 3 — бутанол-1, 4 — н-октан. Значения  $n$  даны в таблице.

Среди исследованных жидкостей ожидаемая квадратичная зависимость  $\tau_d$  от толщины слоя (1) имеет место лишь в случае бутанола и бензинового спирта (рис. 3). Для более вязкого этиленгликоля при больших толщинах величина  $\tau_d$  отклоняется в сторону увеличения, тогда как для маловязкого октана — в сторону уменьшения.

На основе экспериментальных данных можно считать, что в диапазоне вязкости 3–6 мПа·с при толщине слоя  $h < 1.8$  мм зависимость  $\tau_d(h)$  является квадратичной.

Поскольку детектором теплового возмущения, дошедшего до свободной поверхности, является сама поверхность, то с ростом вязкости для создания обнаруживаемой деформации требуется более высокое сдвиговое напряжение, т.е. более высокий градиент температуры (2), а следовательно, и большее время нагрева. Это предположение подтверждается порядком расположения графиков  $\tau_d(h)$  по величине вязкости (рис. 3).

Отклонение от квадратичной зависимости для октана можно объяснить по крайней мере тремя причинами. Во-первых, благодаря высокой подвижности октана ТК растекание слоя может быть инициировано поглощением в слое теплового излучения от нагреваемой подложки. Этот эффект должен усиливаться с увеличением толщины слоя и, по-видимому, является причиной выпадения точек при большой толщине для слоев бутанола и бензинового спирта. Во-вторых, нельзя исключать силу плавучести, роль которой усиливается с ростом толщины слоя. Подтверждением этой гипотезы может быть соответствующий порядок чисел Рэлея:  $Ra_1 < Ra_2 < Ra_3 < Ra_4$  для кривых на рис. 3. И наконец, с момента нагрева жидкости происходит ее расширение и образуется холмик, который начинает растекаться под действием давления Лапласа. Этот процесс поддерживается по мере продвижения теплового фронта.

Вызванное давлением Лапласа центробежное течение на поверхности слоя может усиливать ее чувствительность к центробежному ТК течению. Характеристикой этого процесса является коэффициент объемного расширения  $\beta$ . Как ни странно, порядок расположения графиков также соответствует последнему предположению, т.е.  $\beta_1 < \beta_2 < \beta_3 < \beta_4$ . Чтобы определить вклад каждого из перечисленных выше механизмов, необходимы более детальные исследования.

Работа поддержана Российским фондом фундаментальных исследований (проект № 04-01-00493).

## Список литературы

- [1] *Helmert H., Witte W.* // Optics Commun., 1984. Vol. 49. P. 21–23.
- [2] *Da Costa G., Escalona R.* // Appl. Opt. 1990. Vol. 29. P. 1023–1033.
- [3] *Gugliotti M., Baptista M.S., Politi M.J.* // Langmuir. 2002. Vol. 18. P. 9792–9798.
- [4] *Безуглый Б.А., Тарасов О.А., Федорец А.А.* // Коллоид. журн. 2001. Т. 63. № 6. С. 735–741.
- [5] *Безуглый Б.А., Тарасов О.А.* // Письма в ЖТФ. 2004. Т. 30. Вып. 4. С. 20–24.
- [6] *Carlsaw H.S., Jaeger J.C.* Conduction of Heat in Solids. Oxford: Clarendon press, 1959.
- [7] *McDaniel W., Robinson D.Z.* // Appl. Opt. 1962. Vol. 1. P. 311–321.
- [8] *Loulergue J.C., Xu S.L.* // Int. J. Infrared & Millimeter Waves. 1986. Vol. 7. P. 171–182.
- [9] *Безуглый Б.А.* Канд. дис. М.: МГУ, 1983.