

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства общего и профессионального образования (грант № 97-0-8.1-60) и Тюменского госуниверситета (грант 15-98 1998 г.).

## ЛИТЕРАТУРА

1. Адамсон А. Физическая химия поверхностей. М.: Мир, 1979.
2. Де Жен П. Ж. // УФН. 1987. 7, 4.
3. Абрамзон А. Поверхностные явления и поверхностно-активные вещества. Л.: Химия, 1984.
4. Adam N. K., Jessop G. // J. Chem. Soc. 1863 (1925).
5. Безуглый Б. А., Тарасов О. А., Шепеленок С. В. // Вестник ТГУ. 1998. 2. С. 66-71.
6. Безуглый Б. А., Тарасов О. А., Федорец А. А. // Тез. докл. Международной конференции «Передовые технологии на пороге XXI века». Ч. II. М.: Изд-во НИЦ «Инженер», 1998. С. 457-459.
7. Good R. J. // J. Amer. Chem. Soc. 1952. 74. 5041.
8. Dettre R. H., Johnson R. E., Jr. // Adv. Chem. 1964. 43. 112.
9. Низовцев В. В. // ПМТФ. 1989. 142. 1.
10. Заявка на изобретение № 99106763/28(006503). Способ измерения краевых углов смачивания с помощью наклонной пластинки, основанный на использовании эффекта индуцированной лазерным лучом термокапиллярной конвекции. Приоритет от 26.03.1999.

**Борис Антонович БЕЗУГЛЫЙ** –  
 доцент кафедры радиофизики  
 физического факультета,  
 кандидат физико-математических наук,  
**Олег Александрович ТАРАСОВ** –  
 аспирант,  
**Александр Анатольевич ФЕДОРЕЦ** –  
 аспирант

Удк: 532.22

## **ПРИМЕНЕНИЕ ТЕРМОКАПИЛЛЯРНОГО ЭФФЕКТА ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ ТОЛЩИНЫ ТОНКОГО СЛОЯ ЖИДКОСТИ**

*АННОТАЦИЯ.* Предложен новый способ измерения толщины тонкого слоя жидкости, основанный на термокапиллярном эффекте, индуцированном лазерным пучком. Способ позволяет определять толщину слоя в диапазоне 50...1000 мкм с разрешением ~ 1 мкм и может найти применение в лакокрасочной, химической и электронной промышленности, а также в научно-исследовательских приборах.

*A new method of measuring of thin liquid layer thickness based on the thermocapillary phenomenon induced by laser beam is proposed. The method allows to measure the thickness over the range from 50 to 1000  $\mu\text{m}$  with resolution ~ 1  $\mu\text{m}$  and can be used in paintwork, chemical and electronic industries as well as in physical devices.*

Подавляющее большинство способов определения толщины слоя конденсированной среды применимы к твердым образцам и малопригодны для жидкостей.

Наиболее точный из них — интерферометрический [1] — позволяет определять толщину твердого слоя в интервале от 1 до 1000 мкм с точностью 0,1–3 %, но требует сложного оборудования. Применение его для жидкостей осложняют возникающие из-за микровибраций колебания свободной поверхности.

Способы определения уровня жидкости (поплавковые, емкостные, ультразвуковые и т. д.), как правило, имеют невысокую точность и непригодны для измерения слоев тоньше 1000 мкм.

Новый способ основан на явлении фотоиндуцированной термокапиллярной конвекции, а именно на сильной зависимости диаметра ТК отклика  $D$  от толщины слоя жидкости  $h$ . Он прост, высокоточен и позволяет бесконтактно измерять  $h$  в диапазоне, недоступном или неудобном для других способов.

### ПРИНЦИП ИЗМЕРЕНИЙ

В слое жидкости лазерным пучком возбуждают ТК вихрь, что приводит к динамической деформации свободной поверхности в виде осесимметричного углубления, а толщину слоя определяют по диаметру  $D$  термокапиллярного отклика [2,3]. При постоянных мощности  $P$  лазера и расстоянии  $L$  от слоя до экрана диаметр отклика является функцией теплопроводности подложки, физических свойств жидкости и толщины ее слоя. Для любой системы жидкость/подложка можно получить зависимость диаметра отклика от толщины слоя жидкости  $D(h)$  и в дальнейшем использовать ее как калибровочную в бесконтактных измерениях.

### СХЕМА УСТАНОВКИ

На рис. 1 показана схема установки, где 1 — He-Ne лазер ЛГН-111 ( $P=20$  мВт), 2 — светофильтры, 3 и 4 — зеркала, 5 — экран, расположенный на расстоянии  $L=2.2$  м от слоя, 6 — сосуд с жидкостью, 7 — карболитовая подложка, 8 — слой жидкости, 9 — микрометрический треножник.

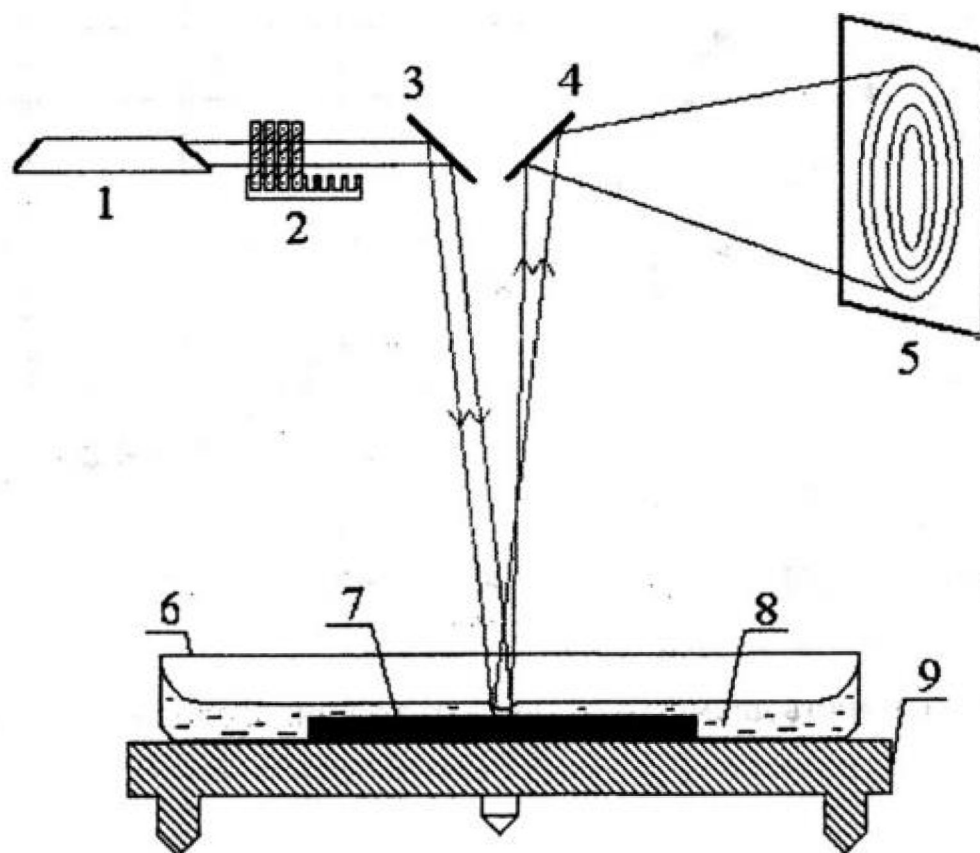


Рис. 1. Схема установки

### РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

На рис. 2 представлены зависимости диаметра термокапиллярного отклика от толщины слоя при пучке, ослабленном светофильтрами до 5 мВт, для следующих жидкостей (снизу вверх): бензиловый спирт, бутанол-1, о-ксиллол, октан. Их вязкость  $\nu$  [4] при 20° С: 5.22; 3.64; 0.92 и 0.77 сСт соответственно.

Для всех веществ с ростом  $\nu$  диаметр отклика уменьшается. При увеличении толщины слоя кривые  $D(h)$  сходятся и при  $h > 850$  мкм уже неразличимы. Дальнейшее увеличение толщины не вызывает изменения отклика. Это связано с тем, что использованные жидкости прозрачны на длине волны 633 нм и излучение лазера поглощается не в их объеме, а поверхностью подложки. В толстых слоях мощность лазерного пучка рассеивается в объеме жидкости и подложки, не создавая на свободной поверхности жидкости градиента температуры, который может вызвать сдвиговое напряжение, достаточное для ее деформации. Диаметр отклика в этом случае соответствует отражению от плоского зеркала жидкости.

В тонких слоях крутизна зависимости  $D(h)$  возрастает, следовательно, возрастает и чувствительность отклика. Когда толщина слоя становится меньше некоторого критического значения, происходит его разрыв. В области значений  $h$ , близких к разрыву, чувствительность ТК отклика максимальна и позволяет измерять  $h$  с разрешением  $\sim 1$  мкм.

Толщина разрыва слоя зависит от вязкости жидкости и, при заданной мощности пучка, уменьшается с ростом вязкости. Например, для октана (рис.2) критическая толщина  $\sim 370$  мкм, а для бензилового спирта уже  $\sim 180$  мкм. Когда толщина слоя жидкости лежит в оптимальном диапазоне (рис.2, бензиловый спирт 200...400 мкм, октан 380...600 мкм), приборная погрешность измерений составляет 0.25–1.5% от толщины слоя. При уменьшении мощности лазерного пучка диапазон оптимальных толщин смещается в более тонкие слои и наоборот — при ее увеличении.

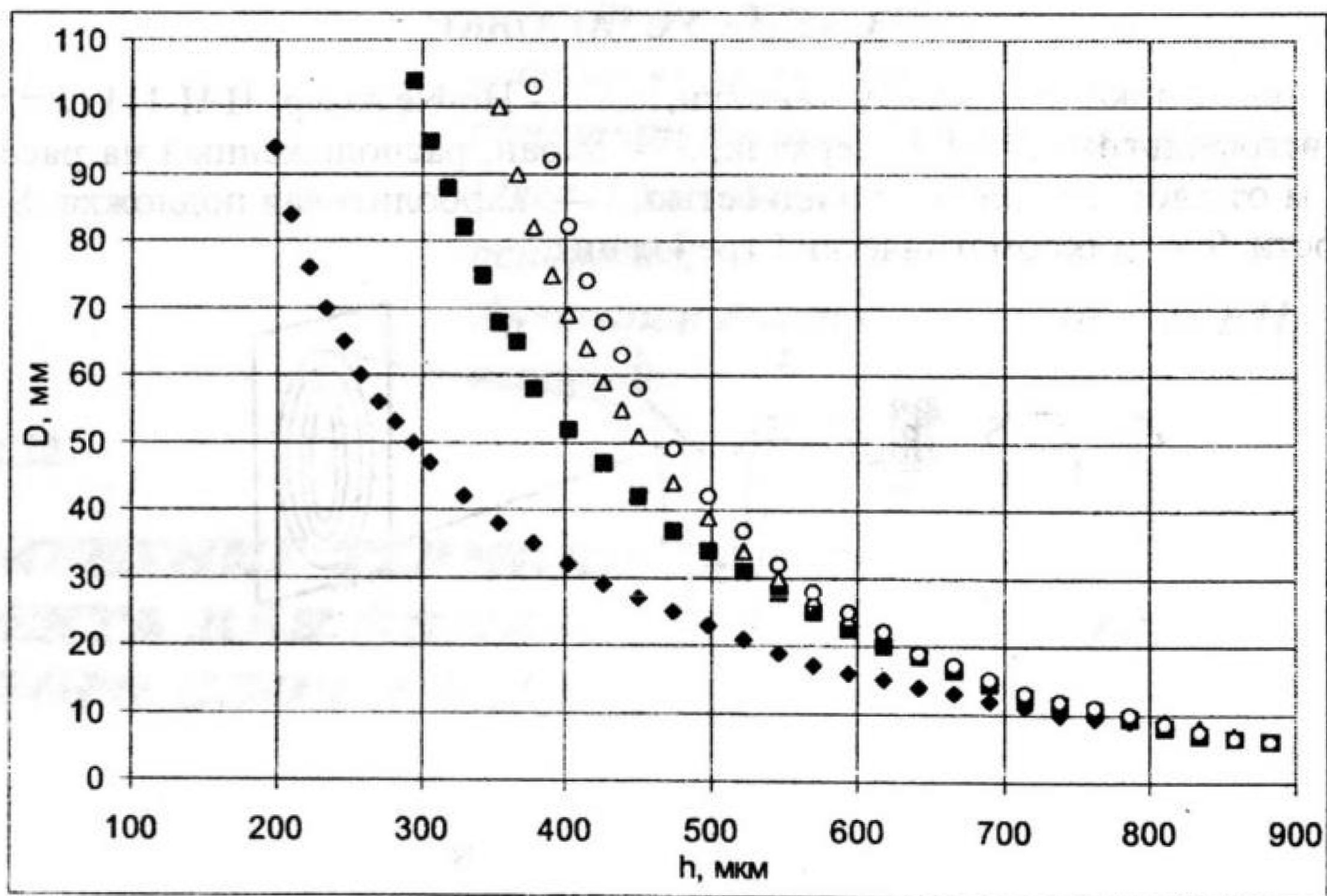


Рис. 2. Зависимость диаметра отклика от толщины слоя жидкости

Верхняя граница толщин, измеряемых предлагаемым способом, определяется условием капиллярности слоя\* жидкости и составляет около 1000 мкм. Нижний предел измерений задается толщиной разрыва пленки жидкости и при ослаблении мощности пучка лазера может быть уменьшен до 50 мкм [2].

\* Статическое число Бонда  $Bo = \rho \cdot g \cdot h^2 / \sigma \ll 1$ .

## ВЫВОДЫ

Предлагаемый способ определения толщины жидких слоев, помимо простоты и надежности, обладает следующими преимуществами:

- измерения производятся бесконтактно;
- оптическая схема не нуждается в точной юстировке и не требует сложного электронного оборудования;
- позволяет измерять толщину слоя жидкости в диапазоне (50...1000 мкм), недоступном большинству других известных методов, с точностью 0.25—1.5% от толщины слоя.

Представленный способ защищен патентом РФ [5]. Работа поддержана грантами № 97-0-8.1-60 в области фундаментального естествознания Министерства образования РФ и № 8-00 ТГУ.

## ЛИТЕРАТУРА

1. А.с. № 1002829, G 01 В 9/02. Способ определения толщины оптически прозрачных слоев. 1983. БИ № 9.
2. Безуглый Б. А. Капиллярная конвекция, управляемая тепловым действием света и ее применение в способах регистрации информации: Дис.: ...канд. ф.-м. наук. М.: МГУ, 1983. С. 228-235.
3. Безуглый Б. А., Тарасов О. А., Шепеленок С. В. // Вестник ТГУ. 1998. 2. С. 66-71.
4. Физические величины: Справочник /Под ред. И. С. Григорьева. М.: Энергоатомиздат, 1991.
5. Патент РФ № 2149353, G 01 В 11/06. Способ измерения толщины тонкого слоя прозрачной жидкости. Приор. 27.07.1998. Б.И. № 14. 20.05.2000.