

03;07;12

Лазерный метод измерения толщины тонкого слоя жидкости на твердой поверхности с помощью термокапиллярного отклика

© Б.А. Безуглый, А.А. Федорец

Тюменский государственный университет
E-mail: bezuglyi@tsu.tmn.ru

Поступило в Редакцию 25 октября 2000 г.

Предложен метод бесконтактного измерения толщин тонкого слоя жидкости на плоской поверхности, основанный на термокапиллярном эффекте, индуцируемом лазерным пучком. Метод также позволяет проводить измерения со слоями жидкости, толщина которых неоднородна из-за негоризонтальности подложки.

В испарительно-конденсационных системах [1], в лакокрасочной промышленности [2] и в ряде химико-технологических пленочных процессов существует необходимость контроля толщины жидкого слоя. Большинство известных методов измерения толщины (ультразвуковые, емкостные, индуктивные и т.д.) разработаны для твердых тел, требуют механического контакта датчика с объектом измерений и практически непригодны для прецизионных измерений тонких (менее 1 mm) жидких слоев. Область применения интерференционных методов ограничивают сложность и дороговизна оборудования и их критичность к трудноустраняемым вибрациям свободной поверхности жидкости.

Предложенный метод основан на эффекте фотоиндуцированной термокапиллярной конвекции (ФТКК), а именно на сильной зависимости размера установившегося термокапиллярного (ТК) отклика¹ от толщины слоя жидкости [3]. Форма и размеры ТК отклика зависят от: свойств жидкости (вязкость, поверхностное натяжение, температурный коэффициент поверхностного натяжения, коэффициент поглощения излучения);

¹ ТК отклик — интерференционная картина, наблюдаемая на экране, помещенном в поперечном сечении каустики части индуцирующего конвекцию лазерного пучка, отраженной от деформированной (в виде углубления) ТК вихрем свободной поверхности жидкости.

геометрии слоя (толщина, неоднородность толщины, статическая кривизна свободной поверхности жидкости); параметров индуцирующего конвекцию лазерного пучка (мощность, диаметр, расходимость); свойства подложки (теплопроводность, коэффициент поглощения излучения).

В [4,5] получены зависимости диаметра D ТК отклика от толщины h слоя в диапазоне (190...1000) μm плоскопараллельных² слоев поглощающих излучение жидкостей с вязкостями $\mu = (0.81 \dots 68) \cdot 10^{-3} \text{ Pa}\cdot\text{s}$ при мощности индуцирующего пучка $P = (2.6 \dots 8) \text{ mW}$. В [4] также рассмотрен случай прозрачной жидкости на поглощающей излучение подложке и исследовано влияние на ТК отклик теплопроводности и коэффициента поглощения подложки. В [6] показано, что ФТКК может быть индуцирована в жидкостях с вязкостью до 1 Pa·s, но не изучено влияние на ТК отклик толщины слоя жидкости. Анализируя [4,5], следует отметить, что, используя зависимость D от h , можно регистрировать изменения толщины Δh с разрешением в 1 μm . Повышение теплопроводности подложки или вязкости жидкости приводит к уменьшению размера ТК отклика и понижению чувствительности.

В силу сложности явления ФТКК возникает необходимость в разработке простой и эффективной методики получения калибровочных зависимостей для заданных систем жидкость/подложка. В [4,5] h контролировали по объему жидкости в сосуде известной формы или помещая на подложку калиброванные по толщине проволоочки [4]. Эти способы трудоемки и достижение приемлемой точности требует высокого мастерства экспериментатора.

Обнаружено, что в случае клиновидного (из-за наклона плоской подложки) слоя жидкости ТК отклик можно характеризовать двумя взаимно перпендикулярными диаметрами, один из которых (рис. 1, D_α) растет с увеличением угла α клиновидности слоя, другой (рис. 1, D_h) остается постоянным и определяется толщиной h слоя жидкости в сечении слоя плоскостью, проходящей через центр пучка и перпендикулярной градиенту толщины слоя. Сканируя слои жидкости с заданным α (рис. 2), можно получить точные калибровочные зависимости.

На рис. 2 представлены зависимости D_h от h для различных жидкостей, нормированные на диаметр d пучка на экране, который наблюдался бы при отражении пучка от плоской свободной поверхности жидкости.

² При однородном по толщине слое отклик имеет форму круга.

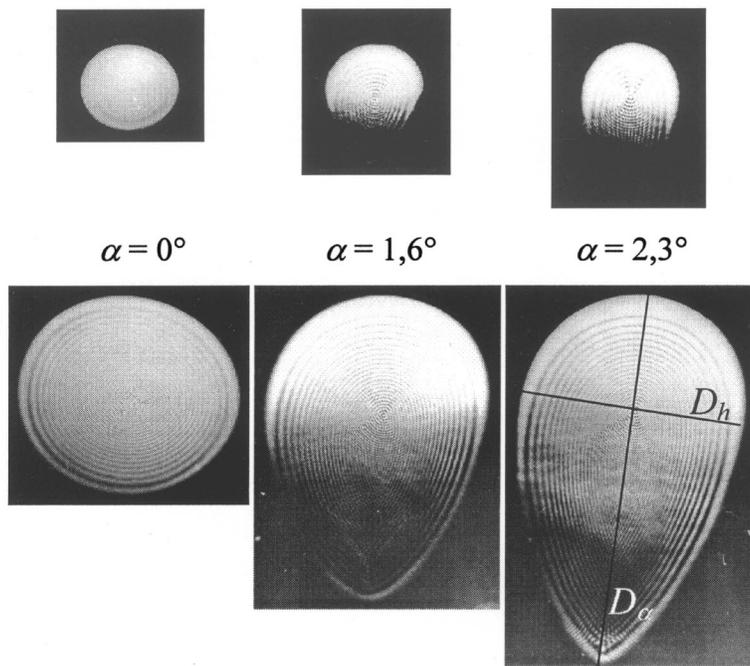


Рис. 1. Фотографии ТК откликов при неоднородных по толщине (из-за наклона подложки под углом α к горизонтали) слоях октана на эбонитовой подложке. Угол α меняли вращением подложки вокруг горизонтальной оси, пересекающейся с осью пучка. Толщина слоя на оси пучка для верхней серии $260 \mu\text{m}$, для нижней $200 \mu\text{m}$.

Заданная мощность пучка определяет диапазон оптимальных для измерений толщин, который в тонких слоях ограничен толщиной прорыва слоя [7], а в толстых — снижением локальной чувствительности отклика (определим ее как $[\Delta(D_h d^{-1})/\Delta h] \cdot 100\%$, где Δh отвечает участку зависимости, который можно аппроксимировать прямой). Увеличение мощности смещает диапазон измерений в область больших толщин. При фиксированной мощности для маловязких жидкостей диапазон измерений шире, а чувствительность ТК отклика выше. Например

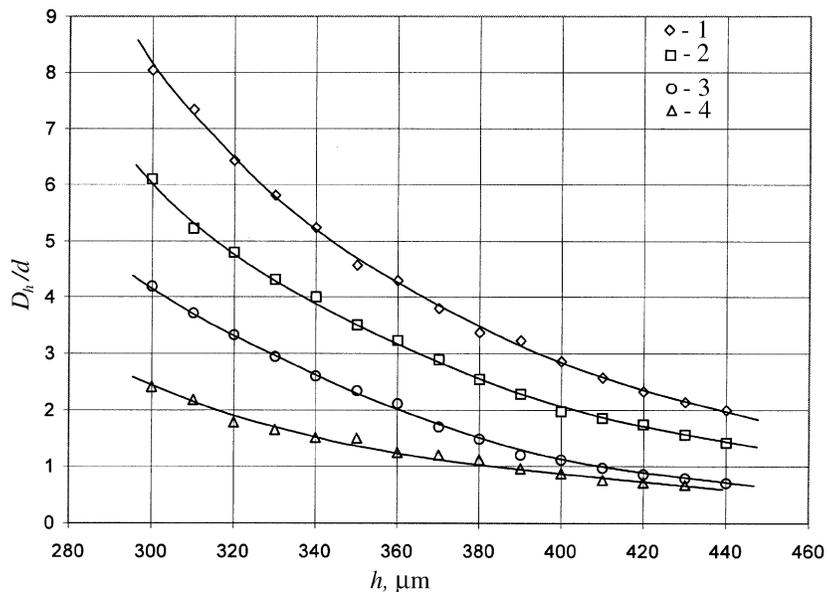


Рис. 2. Нормированные зависимости диаметра отклика от толщины слоя жидкости. He-Ne-лазер типа ЛНГ-207а ($\lambda = 663 \mu\text{m}$, $P = 1.2 \text{ mW}$, расходимость пучка 1.85 mrad), путь пучка от лазера до экрана 370 cm , эбонитовая подложка диаметром 30 и толщиной 3 mm , $\alpha = 2.25^\circ$, 1 — октан, 2 — бутанол-1, 3 — бензиловый спирт, 4 — вазелиновое масло.

(рис. 2), в диапазоне толщин $300 \dots 320 \mu\text{m}$ чувствительность ТК отклика повышается в ряду: вазелиновое масло, октан, бутанол-1, бензиловый спирт (с вязкостями при 20°C : $27, 5.22, 3.64$ и 0.77 cSt): $\sim 3.4, 4.5, 6.3$ и 8.5% от d на $1 \mu\text{m}$ толщины слоя соответственно. Время стабилизации ТК отклика составляет от единиц до нескольких десятков секунд.

Предложенный метод прост, высокочувствителен, не требует дорогого оборудования, и позволяет бесконтактно определять локальную толщину клиновидного слоя жидкости. Метод может найти применение в современных технологических процессах и в исследованиях жидкостных систем.

Работа поддержана грантом № 97–0–8.1–60 в области Фундаментального естествознания Министерства образования Российской Федерации.

Список литературы

- [1] Кабов О.А. Докт. диссертация. Новосибирск: Институт теплофизики СО РАН, 1999. 185 с.
- [2] Яковлев А.Д. Химия и технология лакокрасочных покрытий. Л.: Химия, 1981.
- [3] Безуглый Б.А., Тарасов О.А., Федорец А.А. и др. // Патент РФ № 98114578. 2000. БИ № 14.
- [4] Безуглый Б.А. Канд. диссертация. М.: МГУ, 1983. 270 с.
- [5] Низовцев В.В. // ИФЖ. 1988. Т. 55. (1). С. 85–92.
- [6] Da Costa G., Calatroni J. // J. Appl. Opt. 1979. V. 18 (2). P. 233–235.
- [7] Безуглый Б.А., Федорец А.А. Третий Международный аэрокосмический конгресс IAC'2000: Сб. тезисов. М., 2000. Издательство СИР РИА, 2000. 360 с.