

03;07;12

## Чувствительность термокапиллярного метода измерения толщины слоя прозрачной жидкости на горизонтальной поглощающей поверхности

© Б.А. Безуглый, О.А. Тарасов

Тюменский государственный университет

E-mail: bezuglyi@utmn.ru

Поступило в Редакцию 10 июля 2003 г.

Приведены данные по чувствительности нового метода измерения толщины тонкого слоя жидкости, основанного на определении стационарного диаметра термокапиллярного отклика. В интервале толщин, не превышающих толщину термокапиллярного разрыва слоя на  $10\ \mu\text{m}$ , погрешность метода не превышает  $1\ \dots\ 2\ \mu\text{m}$ . Увеличением мощности индуцирующего термокапиллярную конвекцию пучка в диапазоне  $3.5\ \dots\ 16.5\ \text{mW}$  можно удерживать погрешность измерений на уровне не более 5% в интервале толщин  $150\ \dots\ 1000\ \mu\text{m}$  для жидкостей с вязкостями  $0.8\ \dots\ 5.6\ \text{cSt}$ .

В [1] описан новый метод измерения толщины тонкого слоя прозрачной жидкости на поглощающей плоской подложке, основанный на явлении индуцированной пучком лазера термокапиллярной (ТК) конвекции, и показана возможность применения этого метода для клиновидного слоя. Данные были получены для  $1.2\ \text{mW}$  пучка, что ограничило диапазон измеряемых толщин от 300 до  $440\ \mu\text{m}$ . Мы исследовали чувствительность этого метода при мощностях пучка  $P$  до  $16.6\ \text{mW}$ , что расширяет диапазон измерений до  $1100\ \mu\text{m}$ .

Измерения проводили для плоскопараллельного слоя жидкости при температуре  $24 \pm 1^\circ\text{C}$ . Схема установки приведена в [2]. Пучок многомодового He–Ne-лазера ЛГ-111 ( $\lambda = 633\ \text{nm}$ ) направляли на слой жидкости на  $40 \times 40 \times 4\ \text{mm}$  карболитовой подложке в чашке Петри. Диаметр лазерного пучка на подложке был равен  $3.5 \pm 0.5\ \text{mm}$ . Горизонтальность поверхности подложки выставляли с помощью микрометрического треножника. Толщину слоя  $h$  задавали методом калиброванной проволочки [2], погрешность которого не превышает  $10\ \mu\text{m}$ .

**Таблица 1.** Значения  $h^*$  для слоев исследуемых жидкостей при  $P = 5.5 \text{ mW}$ 

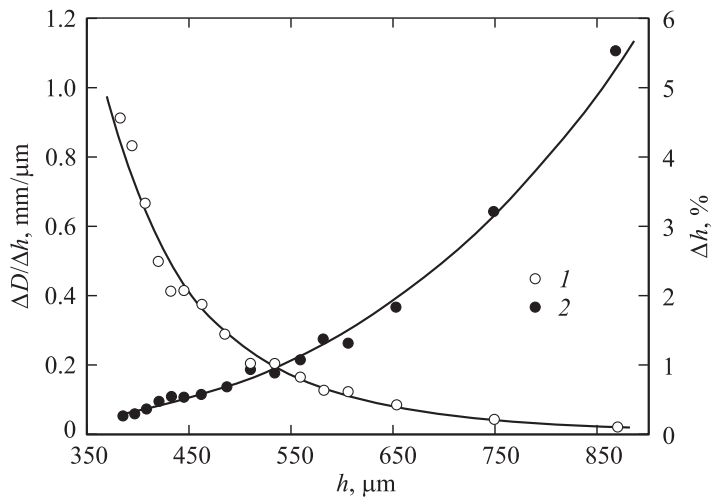
Жидкость	Октан	О-ксилол	Бутанол-1	Бензиловый спирт
$h^*, \mu\text{m}$	380	355	295	200

После стационаризации отклика на экране измеряли штангенциркулем его диаметр  $D$ . Оптический путь луча от слоя до экрана составлял 160 см. Измерения проводили при нескольких значениях  $P$  для четырех жидкостей (октан, о-ксилол, бутанол-1 и бензиловый спирт с вязкостями 0.78, 0.92, 3.64 и 5.56 cSt при 20°C [3,4] соответственно). При этом  $h$  изменяли в диапазоне, который определялся началом возникновения ТК конвекции, когда диаметр пучка на экране становился отличным от его значения для случая отражения от плоского зеркала жидкости, и до критического значения  $h^*$ , когда наступал ТК разрыв слоя (табл. 1).

Чувствительность метода была принята как отношение  $\Delta D/\Delta h$ , где  $\Delta D$  — приращение диаметра отклика, отвечающее приращению толщины слоя  $\Delta h$ . Минимальное значение  $\Delta h$  составляло  $12 \mu\text{m}$ . В слоях исследуемых жидкостей с толщиной, близкой к разрыву, т.е. при  $h \cong h^* + 10 \mu\text{m}$ , значение  $\Delta D/\Delta h$  достигает  $0.8 \dots 0.9 \text{ mm}/\mu\text{m}$ , а при толщинах порядка  $h^* + 300 \mu\text{m}$  уменьшается до  $0.06 \dots 0.10 \text{ mm}/\mu\text{m}$  (данные для  $P = 5.5 \text{ mW}$ ), что показано на примере октана (рис. 1). Совпадение чувствительности метода для жидкостей с разной вязкостью, в отличие от работы [1],\* связано с тем, что здесь мы изучали не фиксированный диапазон толщин, а диапазон вплоть до ТК разрыва слоя каждой жидкости. Отметим, что при одинаковой мощности пучка графики зависимости чувствительности от толщины слоя для исследуемых жидкостей похожи, и их можно совместить параллельным переносом вдоль оси абсцисс.

Обнаружено, что вблизи ТК разрыва слоя значение отношения  $\Delta D/\Delta h$  возрастает с увеличением мощности пучка. Так, для слоя бензинового спирта при  $P = 3.4, 7.6$  и  $16.6 \text{ mW}$  оно достигало 0.8, 1.8 и  $4.6 \text{ mm}/\mu\text{m}$  соответственно. Увеличение чувствительности объясняется тем, что большему значению  $P$  отвечало большее значение диаметра отклика (табл. 2).

\* К сожалению, в этой работе на стр. 23 жидкости приведены не в порядке уменьшения вязкости. Следует читать: вазелиновое масло, бензиловый спирт, бутанол-1, октан.



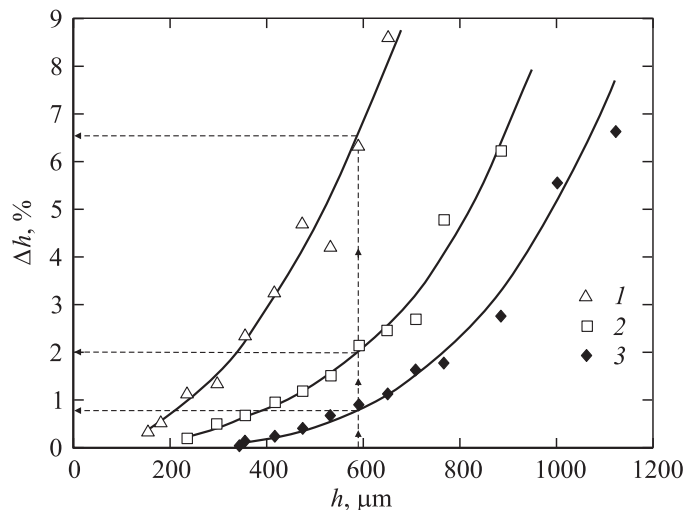
**Рис. 1.** Чувствительность метода (1) и его относительная погрешность (2) при определении толщины слоя октана с помощью 5.5 mW пучка.

Вблизи разрыва слоя диаметр ТК отклика достигал 150...300 мм и из-за размытия края отклика абсолютная погрешность измерения его диаметра составляла 2...4 мм. Тогда, с учетом вышеприведенных значений  $\Delta D/\Delta h$ , точность предлагаемого метода измерения  $h$  можно принять равной 1...2  $\mu\text{m}$ . Такая точность близка к точности интерферометрических методов [5–7], но по сравнению с ними новый метод гораздо менее чувствителен к вибрациям свободной поверхности. По нашей оценке, точность можно повысить в несколько раз, если автоматизировать измерение  $D$  по заданному уровню яркости.

На рис. 1 показана зависимость относительной погрешности определения толщины слоя для октана, при построении которой абсолютную

**Таблица 2.** Диаметр ТК отклика для слоев бензилового спирта с  $h \cong h^* + 10 \mu\text{m}$

$P, \text{mW}$	3.4	7.6	16.6
$h, \mu\text{m}$	155	235	340
$D, \text{mm}$	140	220	300



**Рис. 2.** Уменьшение относительной погрешности измерения толщины слоя с увеличением мощности пучка. Слой бензилового спирта при: 1 —  $P = 3.4 \text{ mW}$ , 2 —  $P = 7.6 \text{ mW}$ , 3 —  $P = 16.6 \text{ mW}$ .

погрешность измерения  $D$  приняли равной  $1 \text{ mm}$ . В диапазоне толщин слоев от  $h^*$  до  $h^* + 300 \mu\text{m}$  относительная погрешность лежит в интервале от 0.3 до 2.5%. При той же мощности ( $5.5 \text{ mW}$ ) графики зависимости относительной погрешности для трех других жидкостей по отношению к  $h^*$  имеют тот же вид.

Так как с увеличением мощности пучка диаметр ТК отклика возрастает почти линейно [8], то это позволяет компенсировать уменьшение  $D$ , связанное с ростом измеряемой толщины слоя или с увеличением вязкости жидкости. Например, для бензилового спирта относительная погрешность измерения толщины  $580 \mu\text{m}$  слоя с помощью 3.4, 7.6 или 16.6 mW пучка составит около 6.5, 2.0 и 0.8% соответственно (рис. 2). Относительная погрешность измерения толщины слоев жидкостей с вязкостями  $0.8 \dots 5.6 \text{ cSt}$  с помощью 16.5 mW пучка в диапазоне толщин, не превышающих толщину ТК разрыва слоя на  $300 \dots 400 \mu\text{m}$ , не превышает  $1 \dots 2\%$ .

\* То же значение абсолютной погрешности было взято и при построении графиков рис. 2.

Верхнюю границу толщин, измеряемых новым способом, можно оценить из условия преобладания ТК сил над термогравитационными, как равную 3 . . . 4 mm [9]. Нижняя граница измеряемых толщин является толщиной ТК разрыва пленки жидкости, и при ослаблении мощности пучка может быть уменьшена до 100  $\mu\text{m}$ .

Работа поддержана грантом для молодых ученых № 118-01 губернатора Тюменской области.

## Список литературы

- [1] *Безуглый Б.А., Федорец А.А.* // Письма в ЖТФ. 2001. Т. 27. В. 9. С. 20–25.
- [2] *Безуглый Б.А., Тарасов О.А.* // Оптика и спектроскопия. 2002. Т. 92. В. 4. С. 665–670.
- [3] *Справочник химика*. Т. 1. 2-е изд., перераб. и доп. М.; Л.: Госхимиздат, 1962.
- [4] *Варгафтик Н.Б.* Справочник по теплофизическим свойствам газов и жидкостей. М., 1963.
- [5] *Приборы для неразрушающего контроля материалов и изделий* / В 2 кн. Под ред. В.В. Клюева. М.: Машиностроение, 1986.
- [6] *Скоков И.В.* Многолучевые интерферометры в измерительной технике. М.: Машиностроение, 1989.
- [7] *Гусев Е.А.* Приборы неразрушающего контроля в машиностроении. М.: Машиностроение, 1993.
- [8] *Безуглый Б.А.* Канд. диссертация. М.: МГУ, 1983. 270 с.
- [9] *Ka Kheng Tan, Rex B. Thorpe.* // Chemical Engineering Science. 1999. V. 54. P. 775–783.