

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 ΔD — приращение диаметра отклика, отвечающее приращению толщины слоя Δh . Минимальное значение Δh 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 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.

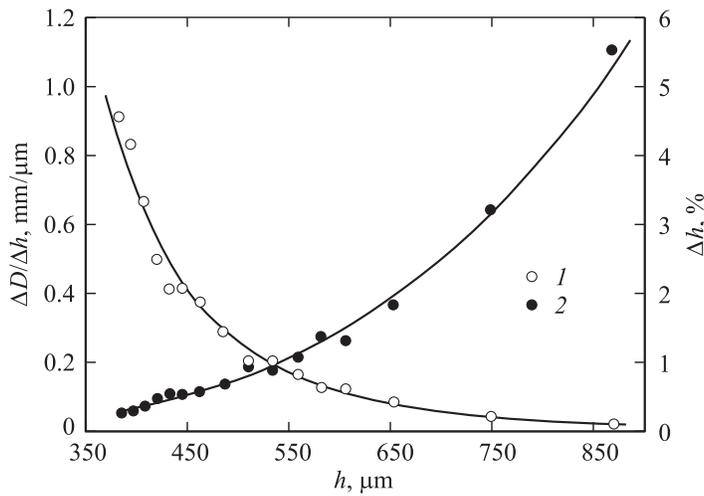


Рис. 1. Чувствительность метода (1) и его относительная погрешность (2) при определении толщины слоя октана с помощью 5.5 mW пучка.

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

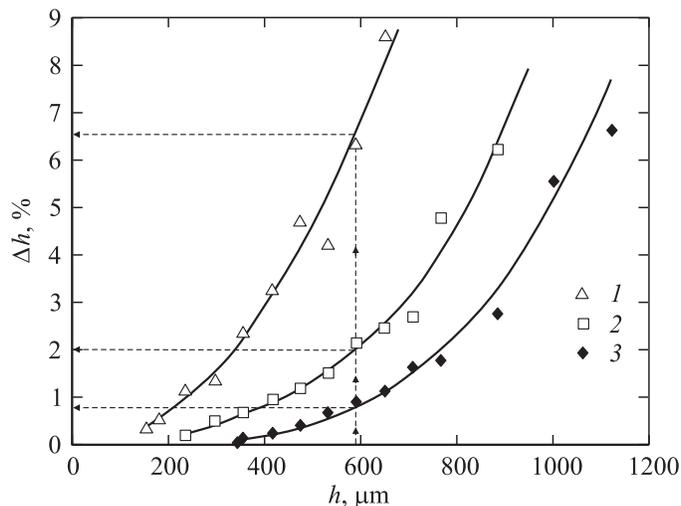


Рис. 2. Уменьшение относительной погрешности измерения толщины слоя с увеличением мощности пучка. Слой бензилового спирта при: 1 — $P = 3.4 \text{ mW}$, 2 — $P = 7.6 \text{ mW}$, 3 — $P = 16.6 \text{ mW}$.

погрешность измерения D приняли равной 1 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 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 μm .

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.