*Вестник Тюменского государственного университета.*
*Физико-математическое моделирование. Нефть, газ, энергетика. 2015. Том 1. № 1(1). 29-33*

**© В.М. ФЛЯГИН**
*Тюменский государственный университет*
*phsci@mail.ru*

**УДК 532.6**

# *ПРИМЕНЕНИЕ ФОТОАБСОРБЦИИ ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПРОФИЛЯ ПОВЕРХНОСТИ ТОНКОГО СЛОЯ ПОГЛОЩАЮЩЕЙ ЖИДКОСТИ, ДЕФОРМИРОВАННОГО ТЕРМОКАПИЛЛЯРНОЙ КОНВЕКЦИЕЙ*

# *PHOTOABSORPTION APPLICATION TO DETERMINE THE SURFACE PROFILE OF A THIN ABSORBING LIQUID LAYER DEFORMED BY THERMOCAPILLARY CONVECTION*

*В статье представлены экспериментальные исследования профиля поверхности тонкого горизонтального слоя жидкости. Деформацию поверхности вызывает эффект термокапиллярной конвекции за счет точечного нагрева жидкости. Измерение локальной толщины слоя проводилось с помощью фотоабсорбции. Видеозапись процесса позволяет отследить динамику развития профиля во времени. Получены профили поверхности для слоя раствора бриллиантового зеленого в н-бутаноле в различные моменты времени с начала нагрева.*

*The paper presents the experimental study of the surface profile of a thin horizontal liquid layer. Surface deformation is caused by thermocapillary convection due to local heating of liquid. The measurement of the local layer thickness was carried out using photoabsorbtion. Video of the process allows to track the dynamics of the profile over time. The surface profiles were obtained for the layer of brilliant green solution in isopropanol at different times from the beginning of the heating.*

*КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА. Применение фотоабсорбции для определения профиля поверхности тонкого слоя поглощающей жидкости, деформированного термокапиллярной конвекцией.*

*KEY WORDS. Thermocapillary convection, thermocapillary deformation profile*

В тонком слое жидкости при его неоднородном нагреве наблюдается термокапиллярная конвекция [1; 2]. Причина этого эффекта заключается в зависимости коэффициента поверхностного натяжения от температуры жидкости. В случае точечного нагрева слоя, расположенного на твердой горизонтальной подложке, на поверхности жидкости формируется градиент поверхностного натяжения. Касательные напряжения, направленные радиально от точки нагрева, образуют поток жидкости, направленный в области с меньшей температурой. Отток жидкости из области нагрева приводит к деформации свободной

*© ФГБОУ ВПО Тюменский государственный университет*

поверхности слоя. Отрицательное давление Лапласа под искривленной поверхностью жидкости вызывает возвратный поток вдоль подложки к области нагрева. В результате оба потока замыкаются, образуя в жидкости тороидальный термокапиллярный вихрь [1; 3].

Термокапиллярная конвекция крайне чувствительна ко множеству параметров слоя жидкости и подложки, что используется в ряде методов, позволяющих проводить измерения вязкости жидкости, мощности нагревательного элемента, тепло- и температуропроводности материала подложки, оценивать степень загрязнения воды ПАВ и пр. [1; 4-7]. Практически во всех методах в качестве информативного сигнала используется отраженное от деформированной поверхности жидкости лазерное излучение, которое при проецировании на экран формирует термокапиллярный отклик [1]. О значении искомой величины судят по диаметру отклика.

Несмотря на обилие методов, сам термокапиллярный отклик исследован слабо. В основном это связано с малым числом работ по изучению профиля деформации свободной поверхности в области нагрева. Отсутствие информации о связи профиля деформации с формой термокапиллярного отклика в конечном итоге усложняет разработанные методы и задерживает их развитие и внедрение в производство.

В представленной работе профиль деформации поверхности жидкости определяется фотоабсорбционным методом. Он обладает рядом неоспоримых преимуществ: бесконтактность, быстродействие, возможность измерения во всех точках поверхности одновременно. В работе [1] метод был использован для получения статического профиля деформации поверхности. При применении видеозаписи с последующей покадровой обработкой появляется возможность наблюдать формирование углубления во времени.

Схема эксперимента изображена на рис. 1.

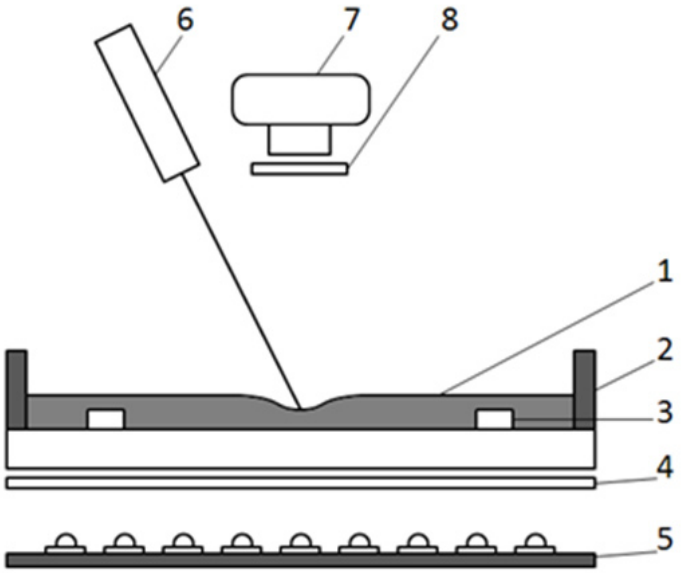


*Рис. 1.* Схема эксперимента

Тонкий слой (1) раствора бриллиантового зеленого в н-бутаноле с концентрацией 1000 мг/л находится в кювете (2) с прозрачным дном из полиметилметакрилата. Толщину слоя контролируют методом калиброванных проволочек [6]. В дно кюветы на разной высоте вмонтированы 8 столбиков из полиметилметакрилата (3), предназначенных для определения реперных точек зависимости толщины слоя от интенсивности прошедшего излучения. Слой подсвечивается снизу через матовое стекло (4) матрицей белых светодиодов (5). Локальный нагрев производится пучком He-Ne лазера ГН-25-1 (6) мощностью 14,8 мВт. Свет нижней подсветки, прошедший через слой жидкости, попадает в видеокамеру (7), запись с которой производится на ПК. Скорость записи составляет 30 кадров/сек, пространственное разрешение — 10 пикселей/мм. Интерференционное зеркало (8) с длиной волны на отражение 633 нм предназначено для исключения засветки видеозаписи лазерным излучением.

При включении лазера жидкость в области падения лазерного пучка поглощает излучение и нагревается, в результате чего возникает термокапиллярная конвекция. Толщина слоя жидкости локально меняется, уменьшая поглощение излучения подсветки. Регистрация светлого пятна на видеозаписи свидетельствует об изменении локальной толщины и появлении деформации слоя жидкости. Зная интенсивность излучения $I$ в областях столбиков, а также толщину слоя $h$ над ними, можно аппроксимировать зависимость $h = f(I)$ по закону Бугера, а затем определить точки профиля деформации (рис. 2).

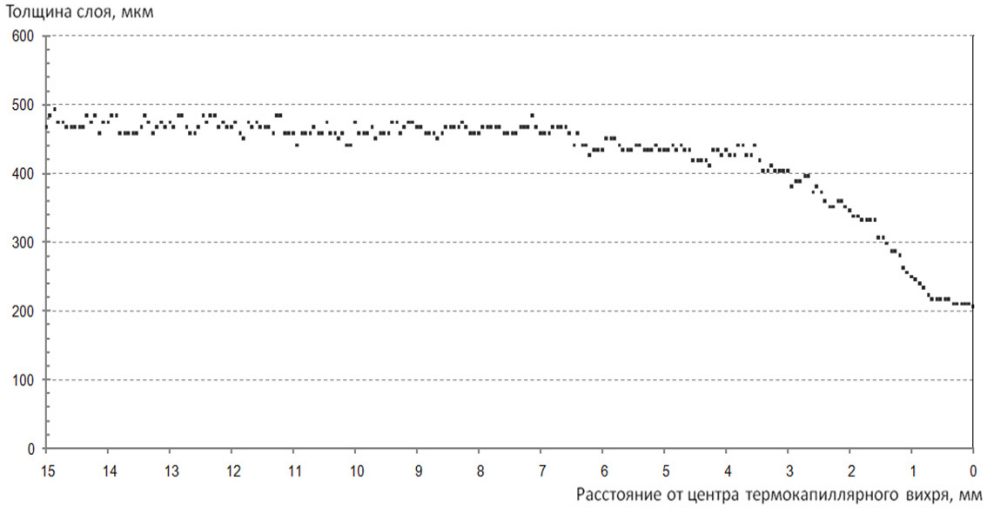


*Рис. 2.* Точки, соответствующие профилю деформации поверхности жидкости спустя 8 сек. после начала нагрева

Восстановленные по методу наименьших квадратов профили для различных моментов времени с начала нагрева показаны на рис. 3.

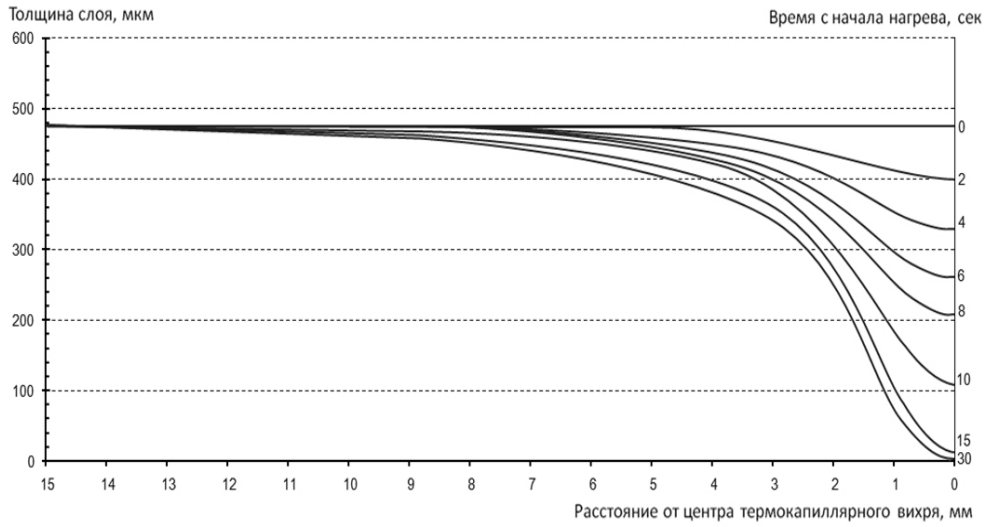


*Рис. 3.* Восстановленные профили деформации поверхности жидкости в моменты времени 1, 2, 4, 6, 8, 10, 15 и 30 сек. после начала нагрева

За счет логарифмической зависимости $h(I)$ шаг измерения получается неравномерным: для максимальной толщины слоя он равен 9 мкм, для близких к нулю толщин — 4 мкм. Шум видеозаписи создает дополнительные флуктуации интенсивности, поэтому на данном этапе погрешность измерения толщины составляет ±30 мкм. Однако технически существует возможность повышения точности измерения в 2-2,5 раза за счет повышения контрастности изображения видеозаписи.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Безуглый Б.А. Капиллярная конвекция, управляемая тепловым действием света и ее применение в способах регистрации информации: дис. ... канд. физ.-мат. наук. М., МГУ, 1983. 270 с.

2. Costa, G. Da, Bentolila, F., Ruiz, E. Laser induced thermohydrodynamic effect in thin liquid membranes // Phys. Lett. 1983. Vol. 95A. № 6. Pp. 313-315.

3. Безуглый Б.А., Флягин В.М. Термокапиллярная конвекция в слое жидкости с квазиточечным источником тепла в подложке // Известия РАН. Механика жидкости и газа. 2007. № 6. С. 124-134.

4. Безуглый Б.А., Федорец А.А. Патент РФ № 2201587. Бесконтактный способ измерения вязкости // Бюллетень № 9. Изобретения. 2003.

5. Безуглый Б.А., Федорец А.А. Патент РФ № 2247968. Экспресс-метод идентификации и контроля качества жидкостей // Бюллетень № 7. Изобретения. 2005.

6. Безуглый Б.А. и др. Фотоиндуцированные капиллярные эффекты: новые области применения // Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования. 2004. № 6. С. 80-83.

7. Безуглый Б.А., Чемоданов С.И. Эффект задержки термокапиллярного отклика слоя прозрачной жидкости при лазерном нагреве поглощающей подложки // Журнал технической физики. 2005. Т. 75, вып. 9. С. 136-138.

## REFERENCES

1. Bezuglyi, B.A. Capillary convection controlled by the thermal action of light and its application in information recording methods // Ph.D. thesis in Physical-Mathematical Sciences. Moscow: Moscow State University, 1983. 270 p. (in Russian).

2. Costa, G. Da, Bentolila, F., Ruiz, E. Laser induced thermohydrodynamic effect in thin liquid membranes // Phys. Lett. Vol. 95A. № 6. 1983. Pp. 313-315.

3. Bezuglyi, B.A., Flyagin, V.M. Thermocapillary convection in a liquid layer with a quasi-point heat source in the substrate // Journal of the Russian Academy of Sciences. Mechanics of Liquid and Gas. Vol. 42. № 6. 2007. Pp. 124-134. (in Russian).

4. Bezugly, B.A., Fedorets, A.A. RF Patent № 2201587 // Bulletin. Inventions. № 9. 2003. (in Russian).

5. Bezugly, B.A., Fedorets, A.A. RF Patent № 2247968 // Bulletin. Inventions. № 7. 2005. (in Russian).

6. Bezugly, B.A. et al. Photoinduced capillary effects: new applications // Journal of Surface Investigation. X-ray, Synchrotron and Neutron Techniques. № 6. 2004. Pp. 80-83. (in Rusian).

7. Bezugly, B.A., Chemodanov, S.I. Effect of delay of the thermocapillary response of a transparent liquid layer during laser heating of the absorbing substrate // Technical Physics. Vol. 75. № 9. 2005. Pp. 136-138. (in Russian).

### Автор публикации

**Флягин Виктор Михайлович** — доцент кафедры радиофизики Физико-технического института Тюменского государственного университета, кандидат физико-математических наук

### Author of the publication

**Victor M. Flyagin** — Cand. Phys. and Math. Sci., Associate Professor, Radiophysics Department, Physics-Technical Institute, Tyumen State University