

УДК 535.31:681.7.001

И.Н. Павлов, Б.С. Ринкевичюс

*Московский энергетический институт (технический университет), Россия,
111250, Москва, Красноказарменная ул., 17, E-mail: inpavlov@bk.ru*

ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДА НАРУШЕННОГО ПОЛНОГО ВНУТРЕННЕГО ОТРАЖЕНИЯ ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ИСПАРЕНИЯ КАПЛИ С ПОВЕРХНОСТИ

НАРУШЕННОЕ ПОЛНОЕ ВНУТРЕННЕЕ ОТРАЖЕНИЕ, ИСПАРЕНИЕ КАПЛИ

В статье приведено описание применения метода нарушенного полного внутреннего отражения для исследования испарения различных капель жидкости с горизонтальной поверхности стеклянной призмы, а также охлаждения капель горячей воды на этой поверхности. Приведено описание созданной установки для проведения таких экспериментов. Приведены результаты экспериментов, их обсуждение, а также перспективы дальнейшего развития.

НАРУШЕННОЕ ПОЛНОЕ ВНУТРЕННЕЕ ОТРАЖЕНИЕ, ИСПАРЕНИЕ КАПЛИ EVAPORATION

ВВЕДЕНИЕ

Задача об испарении капли в окружающий газ – классическая задача для физики, ее решением занимались многие ученые. Тем не менее, она не потеряла актуальности по сегодняшний день в связи с появлением новых возможностей ее применения, таких как приготовление наноматериалов, изучение растяжения молекул ДНК и изображения молекул ДНК [1, 2], методы кристаллографии протеинов [3], разработка методов печати для струйных принтеров [4] и ряда других приложений. В связи с этим возникла необходимость разработки новых методов исследования испарения капель.

МЕТОД ИССЛЕДОВАНИЯ

Предлагаемый метод визуализации испарения капель ранее был успешно применен для исследования пристеночных течений оптически неоднородной жидкости в кювете и микроканалах [5 – 7]. Он основан на явлении нарушенного полного внутреннего отражения (НПВО) и поэтому позволяет регистрировать малые изменения показателя преломления капли в тонком слое толщиной порядка сотен нанометров вблизи поверхности подложки. Суть метода состоит в следующем. На горизонтальную границу раздела стеклянной призмы и воздуха помещается капля жидкости и происходит ее испарение в окружающее пространство. Снизу эта поверхность призмы освещается широким параллельным пучком лазерного излучения, падающим под углом, большим критического угла ПВО для границы стекло-воздух, но меньшим критического угла ПВО для границы стекло-жидкость. Так как условие ПВО для жидкости не выполняется, то коэффициент отражения для части пучка, отраженной от капли меньше коэффициента отражения для части пучка, отраженной от воздуха. Таким образом визуализируется положение капли и ее размер. По значению

коэффициента отражения от капли для данного конкретного угла можно судить о показателе преломления жидкости. Но в случае с когерентным лазерным излучением это затруднительно, т.к. переотраженные от внешней поверхности капли лучи интерферируют с лучами, отраженными от поверхности призмы и на экране вместо распределения интенсивности, соответствующего коэффициенту отражения для имеющихся в действительности показателей преломления наблюдается интерференционная картина.

МОДЕЛИРОВАНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

При расчете интерференционных картин, получаемых на рефракционных изображениях, были использованы следующие допущения. Форма поверхности части капли, от которой отражаются прошедшие через границу раздела лучи, считалась сферической с большим радиусом кривизны. Аналогично расчету колец Ньютона, считалось, что все лучи, отраженные от этой поверхности, остаются параллельными, как и в падающем пучке. А форма поверхности влияет лишь на величину разности хода между ними (рис. 1). В результате несложных математических преобразований была получена следующая формула для разности хода между интерферирующими лучами 1 и 2, отраженными от поверхности капли и отраженными от границы раздела «призма-жидкость»:

$$\Delta l = (AB + BC) \cdot n_e - (DC) \cdot n_c, \quad AB + BC = b - \sqrt{b^2 - 4 \cdot b \cdot x + 4 \cdot \frac{d^2 - y^2}{\cos \alpha}}, \quad b = \frac{d^2 \cdot \operatorname{tg} \alpha}{h \cdot \cos \alpha},$$

где $n_{ж}$ – показатель преломления жидкости, n_c – показатель преломления стекла призмы, x, y – координаты в плоскости распространения пучка, d – диаметр капли, h – ее высота, α – угол между преломленным в капле лучом и границей раздела.

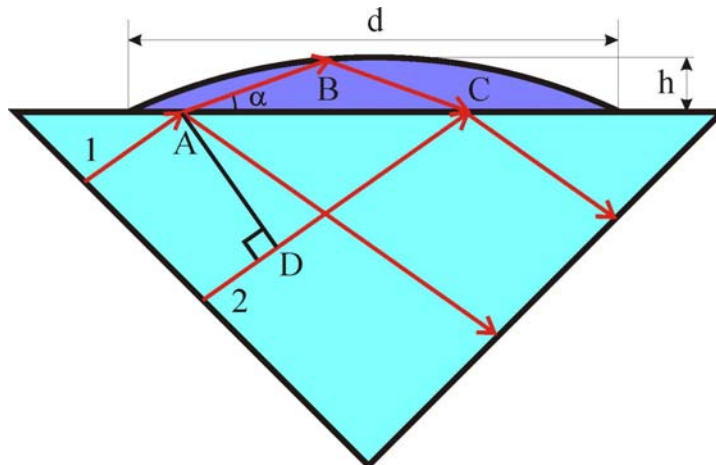


Рис. 1. Ход лучей в капле, находящейся на поверхности призмы: 1 – первый луч, 2 – второй луч

На рис. 2 приведена интерференционная картина, полученная в результате моделирования по приведенной выше формуле.

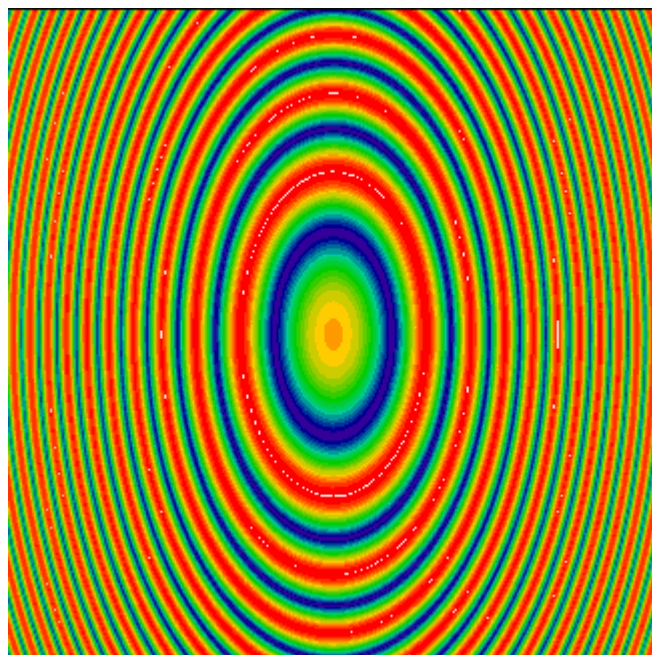


Рис. 2. Расчетная интерференционная картина в отраженном от капли свете

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ УСТАНОВКА

Схема экспериментальной установки представлена на рис. 3. Она работает следующим образом. На горизонтальную поверхность стеклянной призмы помещается капля исследуемой жидкости. Излучение от лазера 1 проходит через оптическую систему расширителя пучка 2, представляющую собой телескопическую систему из двух собирающих линз с разными фокусными расстояниями и пространственный фильтр в виде точечной диафрагмы. Расширенный коллимированный пучок излучения, пройдя через боковую поверхность призмы 3, отражается от ее основания, служащего подложкой для испаряющейся капли 4. Угол отражения соответствует условию ПВО для границы призма-воздух. Далее отраженный пучок попадает на экран 5, изображение на котором регистрируется с помощью ПЗС-камеры 6 и затем обрабатывается на компьютере 7. Внешний вид установки показан на рис. 4.

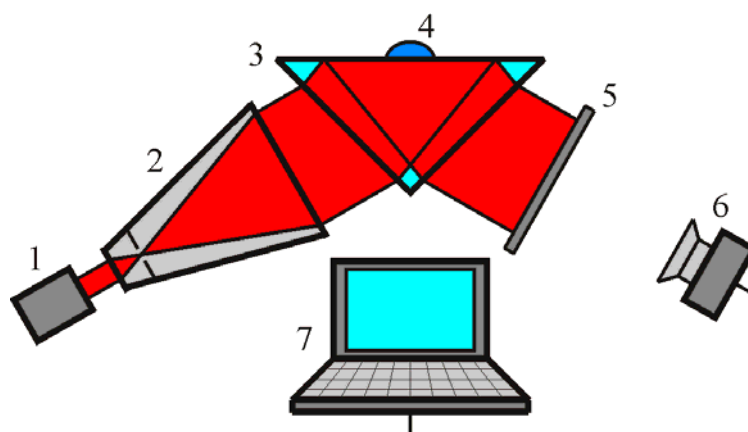


Рис. 3. Схема экспериментальной установки: 1 – лазер; 2 – расширитель пучка; 3 – призма; 4 – капля; 5 – экран; 6 – ПЗС-камера; 7 – компьютер

Так как показатель преломления испаряющейся жидкости больше показателя преломления воздуха, то для нее условие ПВО не выполняется и коэффициент отражения в том месте, где лежит капля меньше, чем для остальной части пучка, отражаемой от воздуха. Соответственно часть излучения попадает внутрь капли и отражается от ее внешней

поверхности, а затем, вновь пройдя через границу раздела жидкость-призма, попадает на экран. Так как между лучами, отраженными от основания призмы и лучами, отраженными от внешней поверхности капли есть определенная разность хода, то на экране возникает интерференционная картина в виде колец. А в связи с тем, что капля постоянно испаряется и форма ее поверхности меняется, то непрерывно меняется и разность хода, поэтому наблюдаемые на экране интерференционные кольца являются бегущими. Период разбега колец зависит от скорости испарения капли, поэтому, подсчитав количество колец за определенный промежуток времени, можно сравнить скорость испарения в разное время. Для воды, ацетона, изопропилового спирта скорость испарения в середине процесса остается примерно постоянной.

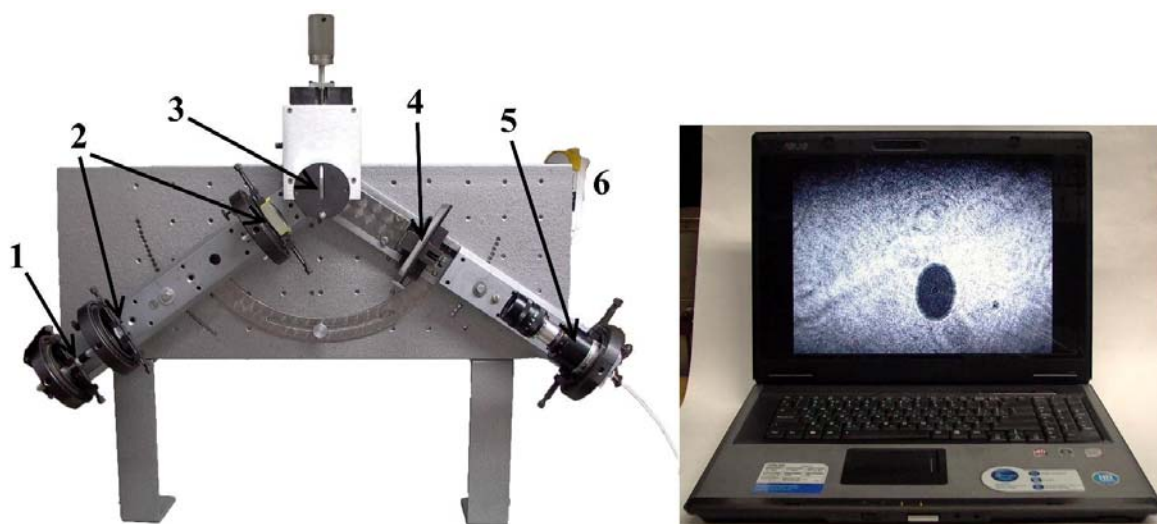


Рис. 4. Фотография установки: 1 – лазер; 2 – оптическая система; 3 – призма; 4 – экран; 5 – видеокамера; 6 – микроконтроллер

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

При проведении экспериментов по исследованию испарения капель жидкости были получены рефрактографические изображения, одно из которых показано на рис. 5.

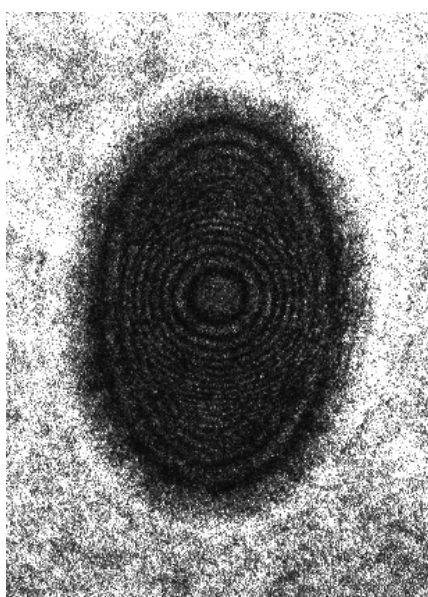


Рис. 5. Пример рефрактографического изображения капли

Из рисунка видно, что рефрактографическое изображение капли имеет две системы интерференционных колец: по контуру капли наблюдается стационарная интерференционная картина, а в центре капли - бегущая интерференционная картина. Изменение во времени последней связано, по всей видимости, с изменением формы и объема капли при испарении, в то время как первая связана только с формой контактной линии капли.

Также проводились эксперименты по визуализации охлаждения капли горячей воды на поверхности призмы. Получено, что по мере остывания капли ее изображение становится более темным, что связано с уменьшением коэффициента отражения из-за увеличения показателя преломления охлаждающейся капли, вызванного понижением ее температуры.

На рис. 6 показаны рефрактографические изображения, полученные в эксперименте с испарением капли сахарного раствора, где зависимость показателя преломления от времени выражена более четко. В этом случае она обусловлена не столько изменением температуры, сколько изменением концентрации раствора, так как при испарении объем воды уменьшается, а объем сахара остается постоянным.

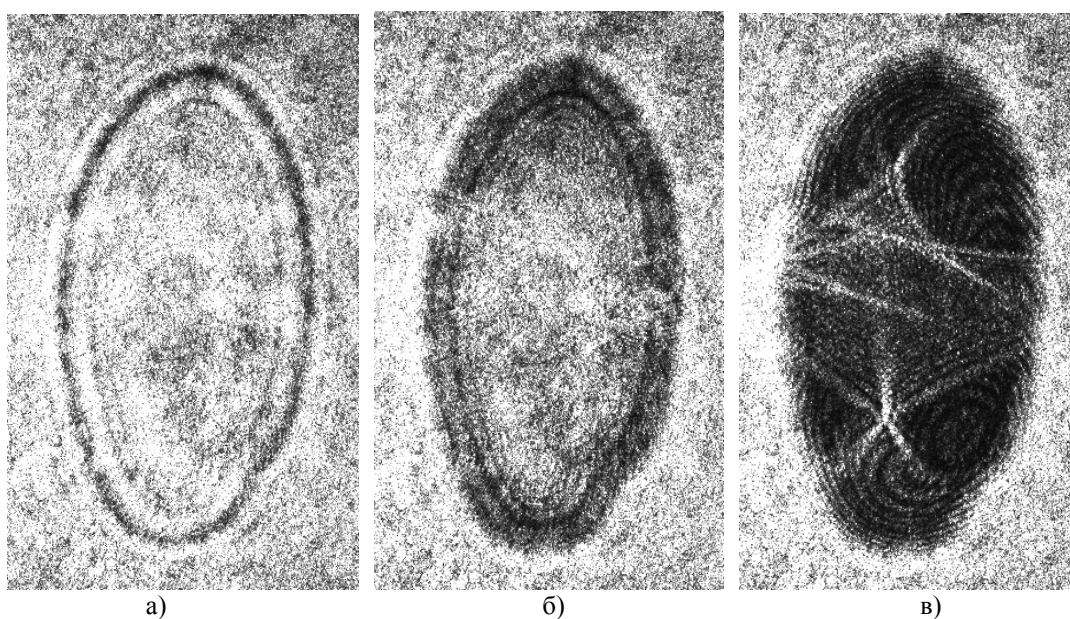


Рис. 6. Рефрактографические изображения капли сахарного раствора в процессе испарения: а – в начале; б – в середине; в – в конце

Проводились исследования испарения капель насыщенного раствора соли, в процессе которых происходила ее кристаллизация на поверхности призмы. Обнаружено, что оставшиеся на поверхности после испарения капли кристаллики соли не нарушают ПВО, что может говорить о том, что между этими кристалликами и поверхностью призмы существует воздушный промежуток толщиной не менее ста нанометров, либо нижний слой имеет пористую структуру.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Показано, что метод нарушенного полного внутреннего отражения, применявшийся ранее для визуализации пристеночных течений неоднородной жидкости в кювете и различных микроканалах, может быть использован для исследования процессов испарения капель с поверхности призмы. Созданная экспериментальная установка на базе полупроводникового лазера мощностью 3 мВт с длиной волны 650 нм и цифровой ПЗС-камеры с разрешением 1392×1040 и скоростью съемки 7 кадров в секунду позволяет проводить эксперименты по визуализации испарения капель различных жидкостей объемом

10 мкл, таких как вода, изопропиловый спирт, ацетон, соленый и сахарный растворы, а также эксперименты по визуализации охлаждения капли горячей воды на поверхности призмы.

БЛАГОДАРНОСТИ

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 10-08-00936-а и ФЦП «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009-2013 гг. (ГК № 02.740.11.0449).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Jing J.P. et. al.** Automated high resolution optical mapping using arrayed, fluid-fixed DNA // Proc. Natl. Acad. Sci. USA Vol. 95, July 1998. Pp. 8046–8051.
2. **Hsieh C.C., Li L. and Larson R.G.** Modeling hydrodynamic interaction in Brownian dynamics: Simulations of extensional flows of dilute solutions of DNA and polystyrene // J Non-Newton Fluid 113:147-191, 2003.
3. **Dimitrov A. S. et. al.** Observations of Latex Particle Two-Dimensional-Crystal Nucleation in Wetting Films on Mercury, Glass, and Mica // Langmuir, 1994, 10 (2). Pp 432–440.
4. **Jong J. et. al.** Marangoni flow on an inkjet nozzle plate // Appl. Phys. Lett. 91, 204102, 2007.
5. **Павлов И.Н., Ринкевичюс Б.С., Толкачев А.В.** Лазерный визуализатор неоднородности пристеночных слоев жидкости // Измерительная техника, 2010, №10. С. 33-35.
6. **Павлов И.Н.** Особенности визуализации перемешивания жидкостей по нарушенному полному внутреннему отражению // Научно-техническая конференция-семинар по фотонике и информационной оптике: сборник научных трудов. М.: НИЯУ МИФИ, 2011. С. 30.
7. **Павлов И.Н., Ринкевичюс Б.С.** Визуализация потоков жидкости по нарушенному полному отражению // Труды конференции "Оптические методы исследования потоков". М.: Изд-во МЭИ, 2009. С. 546-549.

I.N. Pavlov, B.S. Rinkevichyus

*Moscow Power Engineering Institute (technical university), Russia,
111250, Moscow, Krasnokazarmennaya st., 17, E-mail: inpavlov@bk.ru*

APPLICATION OF FRUSTRATED TOTAL INTERNAL REFLECTION FOR RESEARCH DROPLET EVAPORATION FROM THE SURFACE

The paper describes the application of the frustrated total internal reflection method for research the evaporation of liquid droplets from horizontal surface of a glass prism, as well as the cooling drops of hot water on the surface. The description of the experimental setup for this experiments is given. Experimental results, discussion, and the prospects for further development is shown.

FRUSTRATED TOTAL INTERNAL REFLECTION, DROPLET EVAPORATION