

УСТАНОВКА ДЛЯ ВИЗУАЛИЗАЦИИ ИСПАРЕНИЯ КАПЛИ ЖИДКОСТИ МЕТОДОМ НАРУШЕННОГО ПОЛНОГО ВНУТРЕННЕГО ОТРАЖЕНИЯ ЛАЗЕРНОГО ПУЧКА

© 2013 г. И. Н. Павлов, Б. С. Ринкевичюс, А. В. Толкачев

Национальный исследовательский университет “МЭИ”

Россия, 111250, Москва, ул. Красноказарменная, 14

Поступила в редакцию 24.05.2012 г.

Рассмотрены два оптических метода визуализации физических процессов, происходящих в испаряющейся капле жидкости на горизонтальной подложке: метод нарушенного полного внутреннего отражения и интерференционный метод. Описана экспериментальная установка, позволяющая реализовать эти методы. Приведены полученные экспериментальные данные и результаты их обработки.

DOI: 10.7868/S0032816213020134

ВВЕДЕНИЕ

Задача об испарении капли жидкости в окружающий газ не потеряла своей актуальности по сей день, несмотря на огромное количество выполненных по этой теме исследований. Например, в [1] теоретически исследованы различные режимы испарения капли. Согласно расчетам, проведенным авторами этой работы, существует несколько режимов испарения с различным количеством вихрей в капле. Возросший в последнее время интерес к процессам самоорганизации в высыхающих каплях многокомпонентных жидкостей [2] обусловил необходимость разработки и применения различных методов диагностики этих процессов. Исследование испарения капли с помощью микроскопа по обычной методике позволяет получить информацию только о форме капли, но не о контактном слое капли с поверхностью.

В данной работе для визуализации процесса испарения капли использован метод нарушенного полного внутреннего отражения (н.п.в.о.), ранее успешно примененный нами для визуализации неоднородных пристеночных потоков в кювете, плоском и Т-образном микроканалах [3–5].

МЕТОД Н.П.В.О.

Предлагаемый метод визуализации испарения капель основан на явлении н.п.в.о. и позволяет

регистрировать малые изменения показателя преломления капли в тонком (порядка сотен нанометров) слое вблизи поверхности подложки в случае, когда угол падения излучения близок к критическому углу полного внутреннего отражения (п.в.о.). Суть метода состоит в следующем. На горизонтальную границу раздела стеклянной призмы (показатель преломления n_c) и воздуха (n_b) помещается капля жидкости ($n_ж$), и происходит ее испарение в окружающее пространство. Снизу поверхность призмы освещена широким параллельным лазерным пучком, падающим под углом θ_i . Этот угол больше критического угла п.в.о. для границы стекло–воздух, но меньше такого угла для границы стекло–жидкость, т.е. $n_b/n_c < \sin\theta_i < n_ж/n_c$. Так как условие п.в.о. для жидкости не выполняется, то коэффициент отражения для части пучка, отраженной от границы с каплей, меньше коэффициента отражения для части пучка, отраженной от границы с воздухом. Оптимальным с точки зрения чувствительности метода является случай с поляризацией падающего излучения, параллельной плоскости падения [3], поэтому в дальнейшем будем рассматривать именно этот случай. Тогда энергетический коэффициент отражения определяется по формуле:

$$\rho_{\parallel} = \frac{\operatorname{tg}^2 \left[\theta_i - \arcsin \left(\frac{n_c \sin \theta_i}{n_ж} \right) \right]}{\operatorname{tg}^2 \left[\theta_i + \arcsin \left(\frac{n_c \sin \theta_i}{n_ж} \right) \right]}, \quad (1)$$

где θ_i – угол падения пучка излучения, n_c – показатель преломления стекла призмы, $n_ж$ – показатель преломления капли жидкости.

Темное изображение капли, появляющееся в отраженном свете на светлом фоне пучка, отраженного от границы с воздухом, обеспечивает ви-

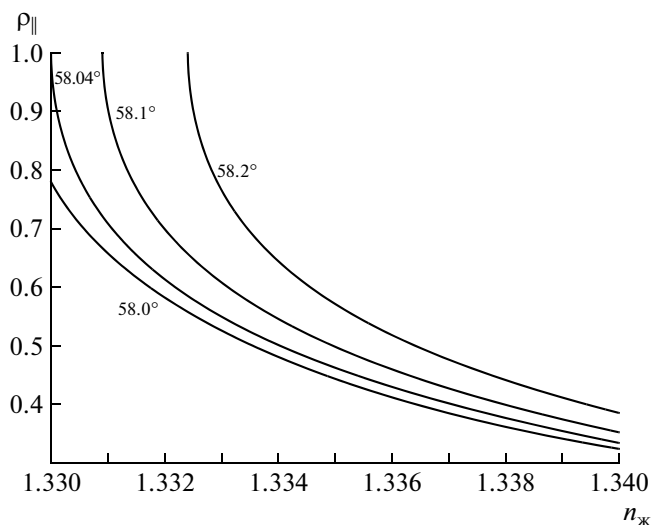


Рис. 1. Графики зависимости коэффициента отражения от показателя преломления жидкости для разных углов θ_i падения пучка (цифры у кривых).

зуализацию положения капли и площади ее пятна контакта с поверхностью. По изменению коэффициента отражения ρ_{\parallel} от капли для заданного угла θ_i можно судить об изменении показателя преломления жидкости n_j . На рис. 1 приведены расчетные графики зависимости коэффициента отражения от показателя преломления жидкости для разных углов падения пучка θ_i при $n_c = 1.5677$.

Анализ рисунка показывает, что метод имеет высокую чувствительность по показателю преломления вблизи критического угла. Созданная установка позволяет заметить изменение показателя преломления жидкости в третьем знаке после запятой.

Метод может быть реализован как для некогерентного излучения, так и при использовании лазера в качестве источника излучения.

ИНТЕРФЕРЕНЦИОННЫЙ МЕТОД

В случае с когерентным лазерным излучением определение действительного коэффициента отражения затруднено, так как отраженные от внешней поверхности капли лучи интерферируют с лучами, отраженными от поверхности призмы, и на экране наблюдается интерференционная картина.

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. По аналогии с расчетом колец Ньютона полагалось, что все лучи, отраженные от такой поверхности, остаются параллельными, как и в падаю-

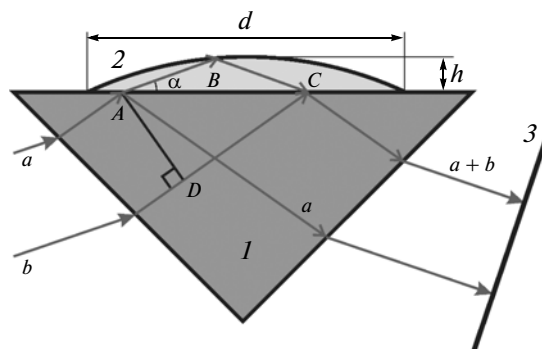


Рис. 2. Ход интерферирующих лучей a и b в капле, находящейся на поверхности призмы. 1 – призма, 2 – капля, 3 – экран.

щем пучке, а форма поверхности капли влияет лишь на величину разности хода между лучами (рис. 2).

В результате несложных математических преобразований получена следующая формула для разности хода Δl между интерферирующими лучами a и b , отраженными соответственно от поверхности капли и от границы раздела призма–жидкость:

$$\Delta l = (AB + BC)n_j - (DC)n_c,$$

$$AB + BC = m - \sqrt{m^2 - 4m\xi + 4 \frac{d^2 - \eta^2}{\cos \alpha}}, \quad (2)$$

$$m = \frac{d^2 \operatorname{tg} \alpha}{h \cos \alpha},$$

где ξ, η – координаты в плоскости границы раздела, d – диаметр капли, h – ее высота, α – угол между преломленным в капле лучом и границей раздела.

Распределение интенсивности в интерференционной картине описывается выражением

$$I(x, y) = I_1 + I_2 + 2\sqrt{I_1 I_2} \cos \Delta \varphi. \quad (3)$$

Здесь $\Delta \varphi = (2\pi/\lambda_0)n_j \Delta l$, где λ_0 – длина волны излучения в вакууме; I_1, I_2 – интенсивности лучей a и b соответственно на экране (в общем случае $I_1 \neq I_2$).

На рис. 3 приведена интерференционная картина, полученная в результате моделирования по приведенной формуле для $d = 3.75$ мм, $h = 0.01$ мм, $\alpha = 5^\circ$, $\lambda_0 = 0.6$ мкм.

ОПИСАНИЕ УСТАНОВКИ

Схема экспериментальной установки представлена на рис. 4. Установка может работать в двух режимах: рефракционном и интерференционном. Излучение от лазера 1 проходит через оптическую систему расширителя пучка 2, представляющую собой телескопическую систему из

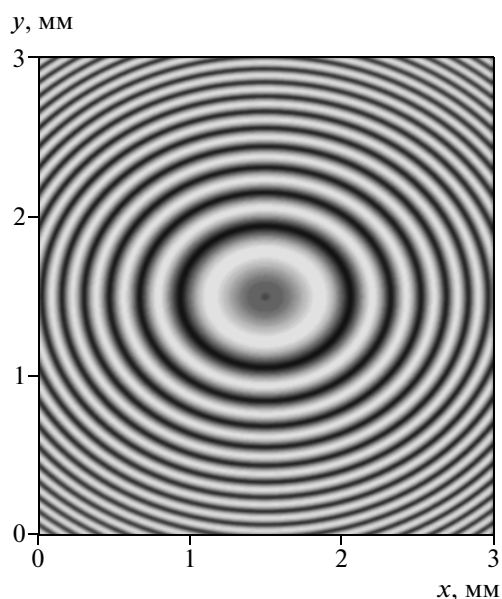


Рис. 3. Расчетная интерференционная картина в отраженном от капли пучке.

двух собирающих линз с разными фокусными расстояниями и пространственного фильтра 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 п.в.о. для границы призма–воздух. Далее отраженный пучок попадает на диффузно рассеивающий экран 5, изображение на котором регистрируется с помощью п.з.с.-камеры 6, после чего обрабатывается на компьютере 7. Внешний вид установки показан на рис. 5.

В отличие от установки, описанной в [6], где использован дифференциальный интерферометр с эталонной каплей для измерения радиуса кривизны исследуемой капли, данная установка позволяет пользоваться как интерференционным, так и методом н.п.в.о. А отличие от установки, описанной в [7], состоит в использовании широкого, а не сфокусированного лазерного пучка, что позволяет не только проводить точечные измерения показателя преломления, но и получать его пространственное распределение в плоскости контактного пятна капли.

На поверхности призмы с помощью микродозатора создается капля исследуемой жидкости заданного объема. Как было показано выше, коэффициент отражения в том месте, где лежит капля, меньше, чем для остальной части пучка, отражаемой от границы с воздухом. Соответственно часть излучения попадает внутрь капли и отражается от ее внешней поверхности, после чего, вновь пройдя через границу раздела жидкость–призма, попадает

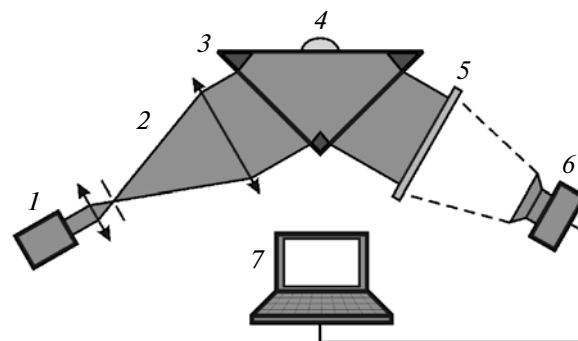


Рис. 4. Схема экспериментальной установки. 1 – лазер; 2 – расширитель пучка; 3 – призма; 4 – капля; 5 – экран; 6 – п.з.с.-камера; 7 – компьютер.

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. В связи с тем, что капля постоянно испаряется и форма ее поверхности меняется, непрерывно меняется и разность хода между лучами, поэтому наблюдаемые на экране интерференционные кольца являются бегущими. Скорость движения 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.

В качестве источника излучения в установке используются полупроводниковый лазер мощностью 3 мВт с длиной волны излучения 650 нм и гелий-неоновый лазер мощностью 10 мВт с длиной волны излучения 633 нм. Оптическая система для формирования широкого коллимированного пучка лазерного излучения диаметром 40 мм состоит из двух линз с разными фокусными расстояниями и пространственного фильтра – точечной диафрагмы. Стеклопластиковая прямоугольная призма имеет показатель преломления $n = 1.5677$ для $\lambda = 650$ нм и закреплена на координатнике, позволяющем перемещать призму по вертикали, с тем чтобы при любом угле падения излучения пучок попадал в середину ее основания. Приемная часть, закрепленная на другом плече, состоит из матового экрана и цифровой видеокамеры, позволяющей снимать 8-битные изображения с разрешением 1392×1040 со скоростью 7 кадров в секунду. На персональном компьютере установлен пакет прикладных программ для цифровой регистрации и обработки полученных рефрактографических изображений.

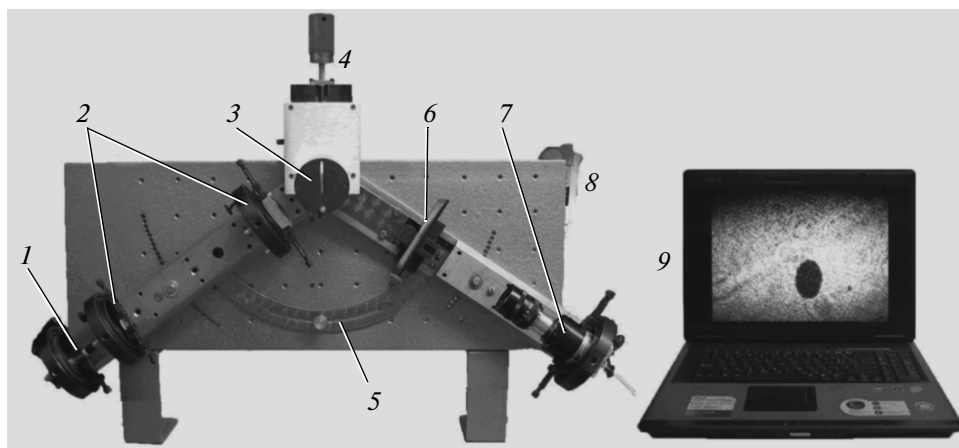


Рис. 5. Фотография установки. 1 – лазер; 2 – оптическая система; 3 – призма; 4 – координатник; 5 – устройство для регулировки угла падения пучка; 6 – экран; 7 – видеокамера; 8 – микродозатор; 9 – персональный компьютер.

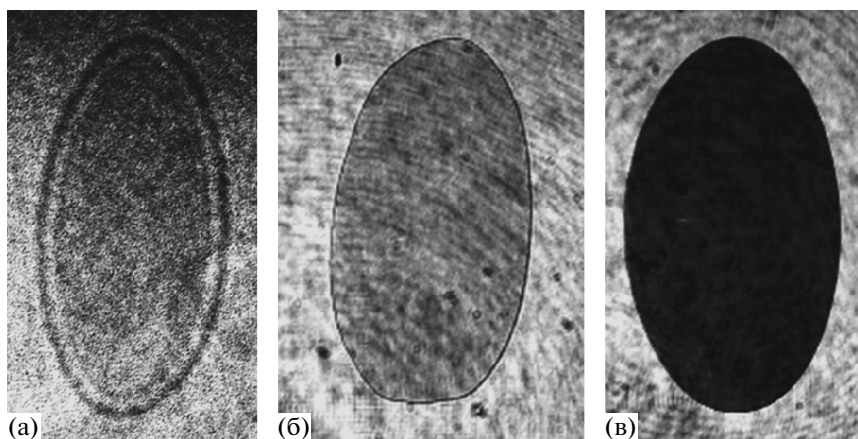


Рис. 6. Рефрактографические изображения капли воды при угле падения пучка, близком к критическому углу п.в.о. (а, б), и при н.п.в.о. (в) при съемке с экрана (а) и непосредственно с поверхности призмы (б, в).

РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

При проведении экспериментов по исследованию испарения каплей воды были получены рефрактографические изображения, типичные из которых показаны на рис. 6. Изображение на рис. 6а получено при съемке с экрана, изображения на рис. 6б и 6в – при съемке непосредственно с поверхности призмы.

Обработка этих рисунков дает зависимость площади контактного пятна капли от времени (рис. 7).

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 капли при понижении ее температуры. В экспе-

рименте определялся контраст M рефракционной картины как отношение разности интенсивностей отраженного света при п.в.о. I_1 и при нарушении п.в.о. I_2 к интенсивности I_1 , т.е.:

$$M = (I_1 - I_2)/I_1 = 1 - \rho_{||}, \quad (4)$$

и по его значению находилось изменение показателя преломления.

На практике удобнее пользоваться графической зависимостью $M = f(n_1, n_2)$. На рис. 8 представлены для сравнения два графика, демонстрирующие рост показателя преломления капли по мере ее охлаждения, соответственно коэффициент контрастности также увеличивается. Изображения приведены для двух разных моментов времени охлаждения капли: t_1 – начало процесса, спустя 2 с после помещения капли на призму

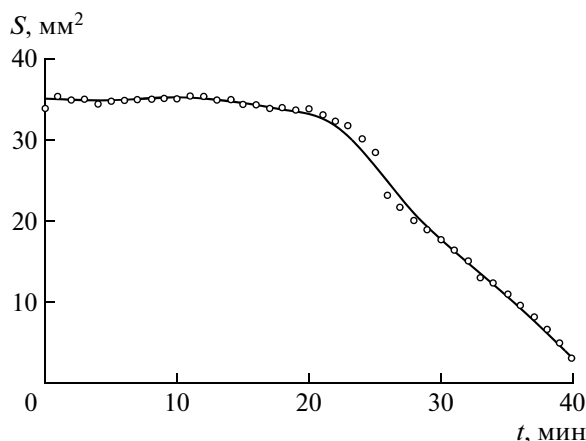


Рис. 7. Зависимость площади контактного пятна испаряющейся капли воды от времени.

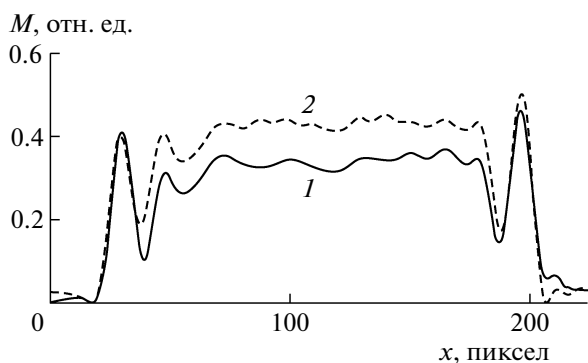


Рис. 8. Графики зависимости коэффициентов контрастности M от координаты по горизонтали для разных моментов времени: $t_1 = 2$ с, $t_2 = 90$ с (см. текст).

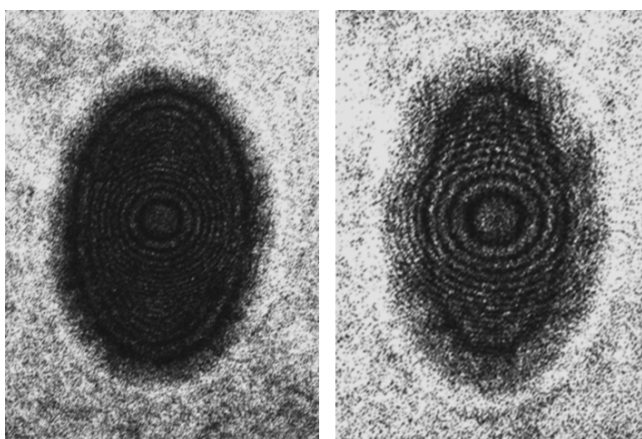


Рис. 9. Примеры рефрактографических изображений капли воды с системой интерференционных колец, полученных для разных углов падения пучка.

(кривая 1); t_2 — конец процесса (кривая 2), спустя 90 с после помещения капли на призму. Начальная температура капли объемом 10 мкл составляет 90°C .

Определив коэффициент контрастности в каждой точке изображения, можно найти распределение показателя преломления по поверхности контакта капли с призмой.

При уменьшении угла падения пучка, когда он становится заметно меньше критического угла п.в.о. для границы раздела призмы с каплей, получается рефрактографическое изображение капли с наложенной на него системой интерференционных колец. Примеры таких изображений приведены на рис. 9.

Из рис. 9 видно, что изображение капли имеет две интерференционные картины: по контуру капли наблюдается стационарная интерференционная картина, форма которой соответствует форме контактной линии капли, а в центре изображения — бегущая система колец. Изменение во времени последней связано с изменением формы и объема капли при испарении.

Подсчет скорости движения колец показал, что для воды она остается примерно одинаковой за время наблюдения колец; для различных углов падения лазерного излучения скорость различается. Для других жидкостей скорость движения колец может существенно меняться во времени (для капли поверхностно-активного вещества минимальная и максимальная скорости различаются в 2 раза).

На последнем этапе испарения бегущая интерференционная картина исчезает, изображение отраженного пучка существенно усложняется. Интерпретация особенностей получаемых при этом изображений требует дополнительных исследований.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработанная экспериментальная установка, принцип работы которой основан на явлении н.п.в.о., позволяет проводить диагностику различных параметров испаряющейся с поверхности призмы капли жидкости, в частности:

- получать распределение показателя преломления по площади контакта капли до третьего запятой;
- подсчетом скорости движения колец бегущей интерференционной картины определять динамику изменения высоты поверхности капли с разрешением $\lambda/2$;
- определять динамику изменения площади контакта капли с подложкой.

Стоит также отметить, что, в отличие от других методов диагностики испаряющейся капли, ме-

тод н.п.в.о. позволяет исследовать именно нижний, контактный слой жидкости.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 10-08-00936-а и ФЦП “Научные и научно-педагогические кадры инновационной России” на 2009–2013 гг. (ГК № 14.740.11.0594).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Barash L. Yu., Bigioni T. P., Vinokur V. M., Shchur L. N.* // Phys. Rev. E. 2009. V. 79. P. 046301.
2. *Тарасевич Ю.Ю., Исакова О.П., Водолазская И.В.* // Материалы I Международной конференции “Процессы самоорганизации в высыхающих каплях многокомпонентных жидкостей”. Астрахань: Издательский дом “Астраханский университет”, 2010. С. 7.
3. *Павлов И.Н., Ринкевичюс Б.С., Толкачев А.В.* // Измер. техника. 2010. № 10. С. 33.
4. *Павлов И.Н., Ринкевичюс Б.С.* // Труды конференции “Оптические методы исследования потоков”. М.: Изд-во МЭИ, 2009. С. 546.
5. *Павлов И.Н.* // Научно-техническая конференция-семинар по фотонике и информационной оптике: сборник научных трудов. М.: НИЯУ МИФИ, 2011. С. 30.
6. *Пызин Г.П., Ушаков В.Л., Речкалов В.Г., Бескачко В.П.* // Вестник ЮУрГУ. Серия “Математика. Механика. Физика”. 2009. Вып. 1. № 22(155). С. 91.
7. *Rajneesh Bhardwaj, Jon P. Longtin, Daniel Attinger* // International Journal of Heat and Mass Transfer. V. 53. 2010. P. 3733.