

*Четырнадцатая Международная научно-техническая конференция
«Оптические методы исследования потоков»
Москва, 26 – 30 июня 2017 г.*

УДК 535.31:681.7.001

И.Н. Павлов, И.Л. Расковская, Б.С. Ринкевичюс, А.В. Толкачев

*Национальный исследовательский университет «МЭИ», Россия,
111250, Москва, Красноказарменная ул., 14, E-mail: inpavlov@bk.ru*

**КОМПЛЕКСНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА ИСПАРЕНИЯ КАПЛИ
ЖИДКОСТИ НА ШЕРОХОВАТОЙ ПОДЛОЖКЕ ЛАЗЕРНЫМИ МЕТОДАМИ**

АННОТАЦИЯ

Описаны результаты исследования параметров капли жидкости, испаряющейся на шероховатой подложке, с помощью нескольких оптических методов: рефракционного, интерференционного, нарушенного полного внутреннего отражения и поверхностного плазмонного резонанса. Приведено описание расчетных методик, принципов работы методов и экспериментальных установок, созданных на их основе, методик проведения экспериментов и результатов обработки полученных изображений. Рефракционным методом с использованием плоского и широкого коллимированного пучка визуализировалась динамика изменения краевого угла и микроструктура рельефа поверхности капли, интерференционным методом визуализировалась форма поверхности и определялась скорость испарения капли, методами нарушенного полного внутреннего отражения и поверхностного плазмонного резонанса исследовались процессы в тонком нижнем пограничном слое капли, лежащей на прозрачной подложке.

КАПЛЯ, РЕФРАКЦИЯ, ПЛОСКИЙ ЛАЗЕРНЫЙ ПУЧОК, ШИРОКИЙ ЛАЗЕРНЫЙ ПУЧОК, НАРУШЕННОЕ ПОЛНОЕ ВНУТРЕННЕЕ ОТРАЖЕНИЕ, ПОВЕРХНОСТНЫЙ ПЛАЗМОННЫЙ РЕЗОНАНС

ВВЕДЕНИЕ

Исследованию капель посвящено немало работ, как теоретических, так и экспериментальных. Интерес исследователей в этой области объясняется как необходимостью пополнения фундаментальных знаний о процессах, происходящих в капле жидкости при различных внешних условиях, так и огромным количеством практических применений результатов таких исследований. В частности, довольно важным является вопрос определения формы поверхности и краевого угла смачивания капель, лежащих на подложке. Информация о поверхностном натяжении и состоянии поверхности имеет большое значение для многих областей науки и техники, таких как материаловедение, нанотехнологии, печатное дело, оптика, нефтяная промышленность, металлургия, приборостроение и других. Например, в [1] описывается устройство для анализа наносероховатостей и загрязнений подложки по динамическому состоянию капли жидкости, наносимой на ее поверхность. Оно применяется авторами для экспресс-контроля степени чистоты поверхности подложек, предназначенных для формирования микрорельефа дифракционных оптических элементов. В [2] обсуждается, как смачиваемость и шероховатость твердых тел влияют на их гидродинамические свойства. Описано, что

наличие шероховатости может существенно влиять на гидрофобное проскальзывание. Этот эффект может быть использован для получения особых гидродинамических свойств, таких как гигантское межфазное скольжение, супертекучесть, смешивание и низкое гидродинамическое сопротивление, которые не могут быть получены без учета шероховатости. Исследованию формы капли также посвящено немало работ. Например, в [3] описана рефракционная система для исследования испарения капель жидкости с твердой поверхности, основанная на теневом фоновом методе визуализации оптически неоднородных сред. Показано, что после растекания капли по поверхности стекла в ней происходит перераспределение жидкости, это соответствует изменению цвета и формы капли на изображениях, полученных после обработки экспериментальных данных.

Классическая теория явлений на межфазных границах [4, 5] основана на использовании двух параметров — коэффициента поверхностного натяжения жидкости и краевого угла смачивания жидкостью поверхности твердого тела. Однако такой подход дает удовлетворительные результаты только для капель относительно небольших размеров [6], так как не учитывает влияния силы тяжести на значения краевого угла и форму капель. Кроме того, реальные поверхности практически всегда являются шероховатыми или загрязненными, что сказывается на форме капель, помещенных на такие поверхности. В ряде работ [7-9] рассматривались теоретические модели капель на неровной подложке с использованием полиномиальной аппроксимации контура капель, а также подходы, совмещающие в себе глобальную аппроксимацию формы капли с локальной аппроксимацией каких-либо её геометрических параметров. Однако, как указано в [6], создание единой модели в данной ситуации, очевидно, затруднено из-за многообразия факторов, влияющих на форму капли.

В связи с вышесказанным представляется актуальной разработка экспериментальной методики измерения локальных углов смачивания и реконструкции формы поверхности капли в каждой конкретной ситуации, представляющей интерес для исследователя. Самостоятельное значение имеет исследование неравновесных локальных углов смачивания и локальных микроструктур, возникающих на поверхности капли при ее испарении или кристаллизации. Особенностью предлагаемых методик является использование для визуализации микронеоднородностей рельефа поверхности широких лазерных пучков, позволяющих получать изображения, анализ которых дает возможность восстановить параметры капли по всей поверхности или линии контакта. Дополнительно для зондирования капли на прозрачной подложке использовались плоские лазерные пучки [10], позволяющие восстанавливать значения функции уровня поверхности в дискретном наборе сечений капли с последующей реконструкцией и компьютерной визуализацией ее глобального и микрорельефа.

Ранее авторами статьи для исследования параметров пристеночного слоя капель жидкости успешно применялся метод нарушенного полного внутреннего отражения (НПВО) широкого коллимированного лазерного пучка [11, 12]. С помощью этого метода можно измерять площадь контактного пятна капли, лежащей на подложке, скорость испарения, кристаллизации, растекания или перемешивания капель жидкости на горизонтальной подложке, а также изменение показателя преломления тонкого пристеночного слоя капли толщиной несколько сотен нанометров. Чтобы расширить диапазон измеряемых параметров капли с помощью созданной для этого метода экспериментальной установки, было предложено разработать новый метод, позволяющий определять форму поверхности капли, лежащей на горизонтальной подложке, на основе полученных интерференционных картин.

РАЗРАБОТАННЫЕ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ МЕТОДИКИ

Рефракционный метод

В экспериментах с использованием рефракционного метода визуализировались микронеоднородности и форма рельефа поверхности капли дистиллированной воды, образующиеся в процессе ее испарения с шероховатой подложки. С этой целью была создана экспериментальная установка, схема которой изображена на рис. 1 [13].

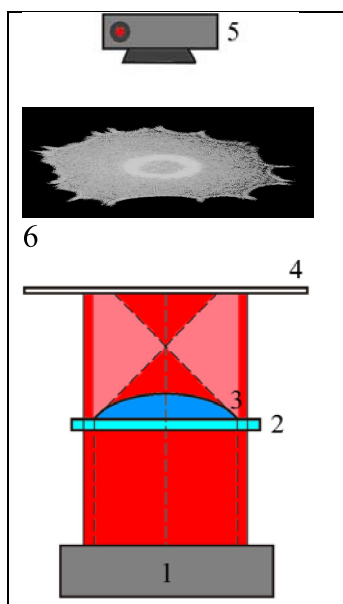


Рис. 1. Схема экспериментальной установки для рефракционного метода: 1 – система формирования зондирующего пучка, 2 – прозрачная подложка, 3 – исследуемая капля, 4 – экран, 5 – цифровая камера, 6 – пример полученного изображения

В ней применялось вертикальное зондирование капли на прозрачной подложке широким коллимированным или плоским лазерными пучками. Примерно через 10 с после нанесения капли на шероховатую поверхность формировались характерные рефракционные изображения 6.

Метод нарушенного полного внутреннего отражения

Схема экспериментальной установки [12] для реализации метода НПВО представлена на рис. 2. Лежащая на поверхности измерительной призмы с показателем преломления n_1 капля (n_2) свободно испаряется в окружающее пространство – воздух (n_3). Поверхность призмы освещается широким параллельным лазерным пучком, падающим под углом θ_i , большим критического угла ПВО для границы стекло-воздух, но меньшим такого угла 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. Поэтому в отраженном свете на светлом фоне пучка, отраженного от границы с воздухом, видно темное изображение капли. На первом этапе испарения имеет место пиннинг (задержка сдвига) линии трехфазного контакта; при этом площадь пятна контакта остается примерно постоянной, меняется лишь высота капли, что соответствует результатам, полученным на основе рефракционного метода. После достижения некоторого критического значения высоты капли площадь контактного пятна уменьшается практически линейно.

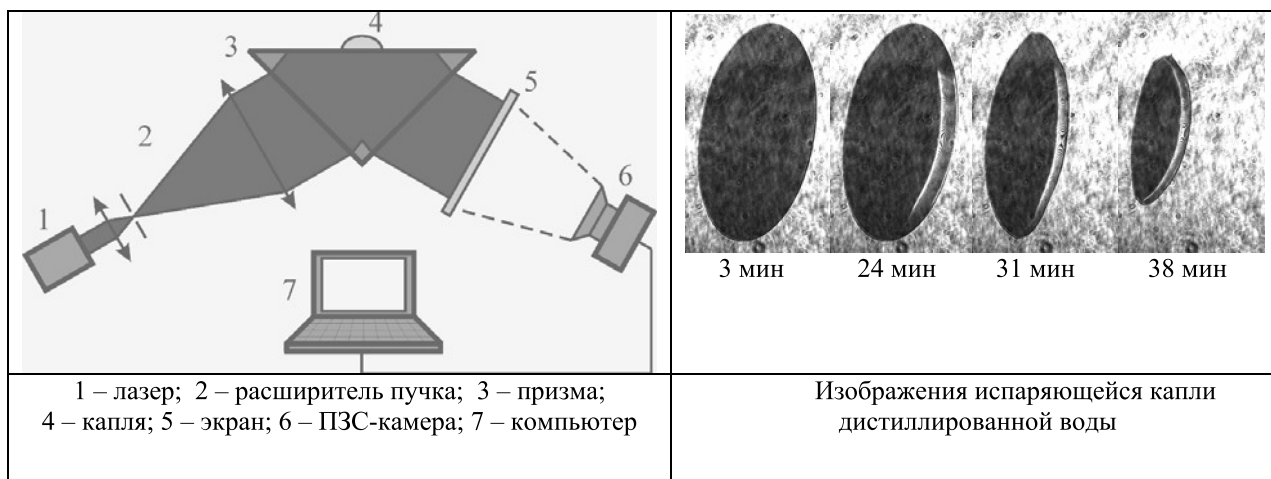


Рис. 2. Схема экспериментальной установки для реализации метода НПВО и визуализация контактного пятна

Интерференционный метод

В описанной выше схеме в случае НПВО лучи проникают внутрь капли, отражаются от ее внешней поверхности и интерферируют с лучами, отраженными от внутреннего основания стеклянной призмы. Схема формирования интерференционной картины показана на рис. 3. В результате получается интерференционная картина, схожая с кольцами Ньютона. Причем, так как при испарении форма поверхности и высота капли непрерывно меняются, то кольца получаются бегущими. Путем подсчета скорости разбега колец можно оценить скорость испарения капли. По форме колец можно восстановить форму поверхности капли в процессе испарения.

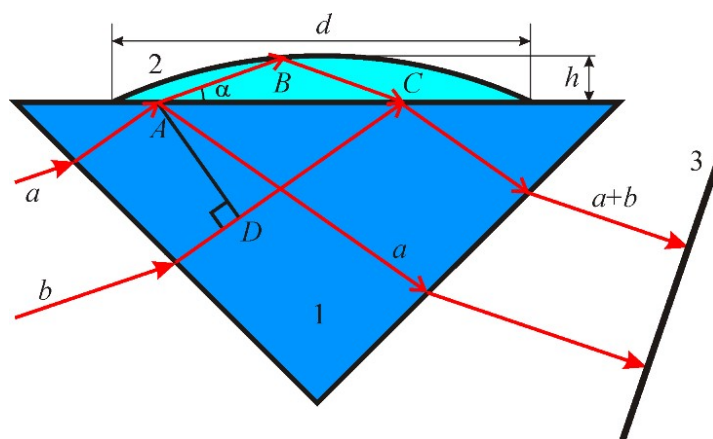


Рис. 3. Пути интерферирующих лучей a и b в капле жидкости, помещенной на поверхность призмы: 1 – призма; 2 – капля жидкости; 3 – экран

Метод поверхностного плазмонного резонанса

Схема установки, работающей на основе метода поверхностного плазмонного резонанса (ППР) [14] показана на рис. 4. Она отличается от схемы метода НПВО наличием тонкой металлической пленки на границе раздела между призмой и исследуемой средой. Как известно, при условиях полного внутреннего отражения за границей раздела образуется эванесцентная волна, с помощью которой становится возможна генерация поверхностных плазмонов (колебаний плотности свободных электронов) на поверхности металлической пленки. Более того, существуют определенные резонансные условия, при которых, несмотря на выполнение условия полного внутреннего отражения, интенсивность отраженного света равняется нулю, так как вся энергия падающего света расходуется на генерацию

поверхностных плазмонов. При отклонении одного из параметров (например, показателя преломления жидкости в пограничном слое) от резонансного значения интенсивность в соответствующем месте изображения становится отличной от нуля и по ее величине можно судить о количественном значении отклонения параметра.

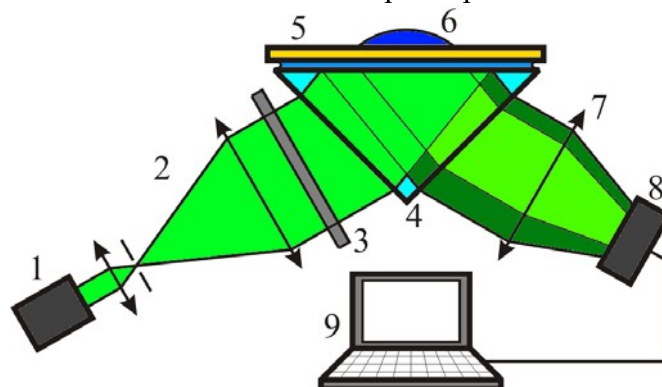


Рис. 4. Схема экспериментальной установки для метода ППР: 1 – лазер, 2 – расширитель пучка, 3 – поляризатор, 4 – призма, 5 – стеклянная пластинка с металлическим напылением, 6 – исследуемая капля, 7 – объектив, 8 – ПЗС-камера, 9 – компьютер

ОБРАБОТКА ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ РЕЗУЛЬТАТОВ И МОДЕЛИРОВАНИЕ

Рефракционный метод

Результаты моделирования наблюдаемых в эксперименте изображений в рамках приближения геометрической оптики позволили установить, что дугообразные участки контура могут формироваться из-за наличия в области линии контакта микронеоднородностей рельефа поверхности капли в виде выпуклостей с характерным размером 10-100 мкм. Формирование характерного контура на изображении можно объяснить тем, что переход от выпуклых к вогнутым участкам неизбежно сопровождается появлением на поверхности капли в области линии контакта точек (линий) перегиба. Поскольку рефракционное изображение является градиентным отображением поверхности уровня капли, сопоставляющим точке значение градиента в ней [5], особенности изображения будут проявляться там, где луч является асимптотическим для поверхности препятствия, т.е. в точках перегиба. Такие лучи образуют ребро возврата, которое визуализируется как каустика. Таким образом, яркий контур изображения представляет собой участки каустик, образующихся при наличии линий перегиба на поверхности капли вблизи линии контакта.

На рис. 5 представлено рефракционное изображение, смоделированное для случая выпуклых участков микрорельефа. Аналогичное изображение будет наблюдаться, если вместо выпуклых участков будут вогнутые с теми же характерными размерами. Анализ рефракционных изображений и их моделирование [15] позволили сделать вывод о том, что радиус контура рефракционного изображения определяется локальным значением соответствующего угла смачивания.

Рефракционное изображение на рис. 5 было получено с учетом параметров глобального рельефа капли, восстановленного на основе ее зондирования плоским лазерным пучком в соответствии с методикой, изложенной в [13]. Смоделированный рельеф поверхности капли, соответствующий данному изображению представлен на рис. 6.

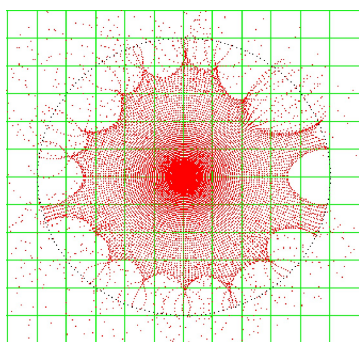


Рис. 5. Рефракционное изображение капли при наличии микрорельефа (моделирование)

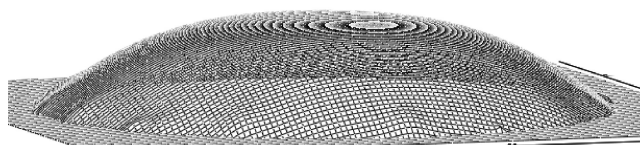


Рис. 6. Форма капли, соответствующая рисунку 5

Метод нарушенного полного внутреннего отражения

Кроме исследования испарения капли жидкости с подложки, на основе метода НПВО разработана методика и проведены экспериментальные исследования процесса растекания капли на поверхностях с разными шероховатостями. В качестве таких поверхностей использовались основания призм, обработанные шлифовальными порошками с различным размером зерен – М-28, М-14 и М-7. Предметом исследования являлось динамическое состояние капли жидкости после ее попадания на поверхность подложки. Капля создавалась с помощью микродозатора «Ленпипет Лайт», жестко закрепленного на установке сверху призмы. Характерные времена изменения размера контактного пятна капли – десятки мс, поэтому для регистрации изображений использовалась высокоскоростная камера HiSpec 2G Mono фирмы Fastec Imaging. Камера фокусировалась на поверхность призмы в том месте, куда помещалась капля. Угол падения излучения был больше угла ПВО для границы раздела призма-воздух, но меньше такого угла для границы призма-жидкость в случае с гладкой поверхностью. При этом получалось темное изображение капли на светлом фоне. Изображения записывались с частотой 1500 Гц. Примеры полученных изображений для растекания капли дистиллированной воды по гладкой поверхности призмы показаны на рис. 7а, а на рис. 7б – для растекания капли по поверхности призмы, обработанной порошком М-7. После обработки полученных изображений были построены кривые зависимости площади контактного пятна от времени в начальный момент падения капли, которые показаны на рис. 9.

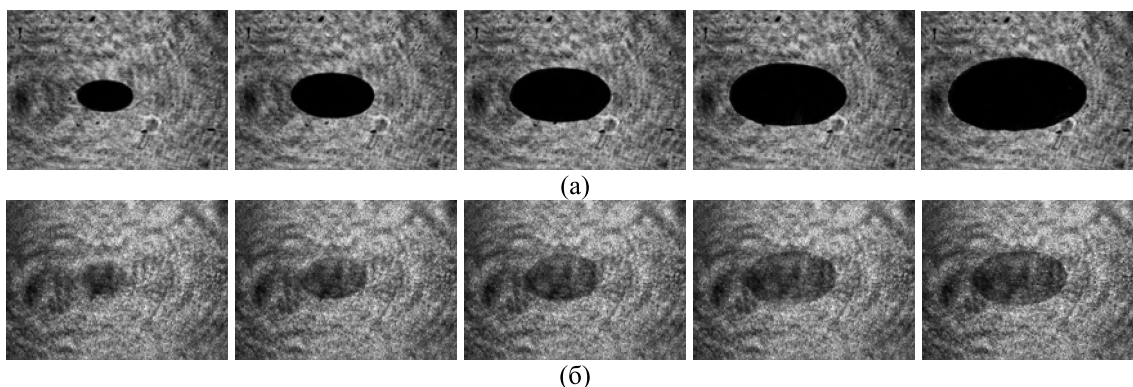


Рис. 7. Растекание капли воды по поверхностям с разными шероховатостями: (а) гладкой и (б) шероховатой

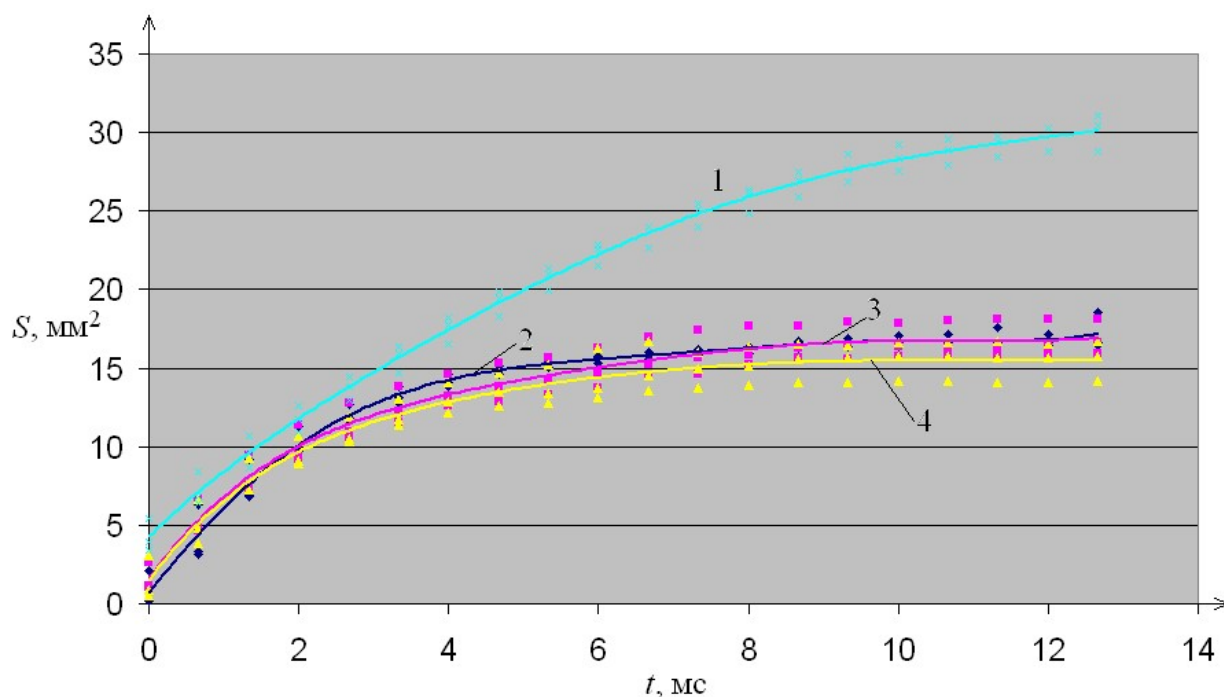


Рис. 8. Графики зависимости площади контактного пятна капли от времени для поверхностей с разными шероховатостями: 1 – гладкая поверхность, 2 – поверхность, обработанная порошком М-7, 3 – поверхность, обработанная порошком М-14, 4 – поверхность, обработанная порошком М-28

Интерференционный метод

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. Форма поверхности влияет лишь на величину разности хода между ними (рис. 3). 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»:

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

где $n_{ж}$ – показатель преломления жидкости, $n_{с}$ – 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.

На рис. 8а приведена интерференционная картина, полученная в результате моделирования по приведенной выше формуле, а на рис. 8б – для сравнения пример полученной в эксперименте интерференционной картины. Так как форма пятна контакта круглой капли с подложкой выглядит в виде эллипса из-за наклонного падения света, то кольца в интерференционной картине также получают эллиптическими.

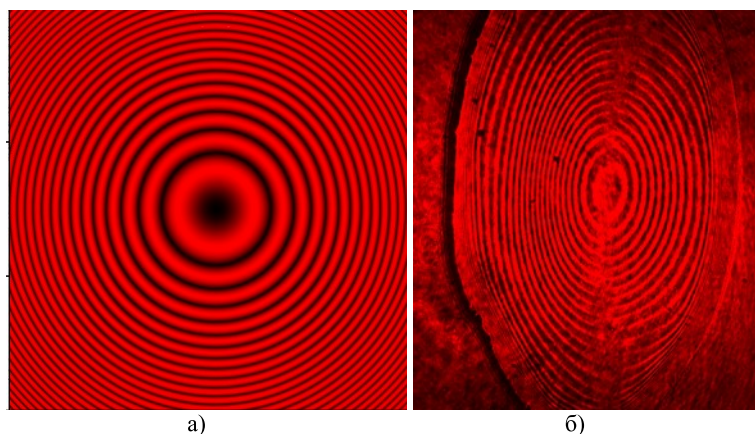


Рис. 8. Расчетная (а) и экспериментальная (б) интерференционные картины для испаряющейся капли дистиллированной воды

Метод поверхностного плазмонного резонанса

На собранной по приведенной выше (рис. 4) схеме установке были проведены эксперименты по визуализации перемешивания, охлаждения и кристаллизации капель различных жидкостей. На рис. 9 приведена последовательность изображений, полученных при визуализации перемешивания капли воды и капли глицерина для разных моментов времени.

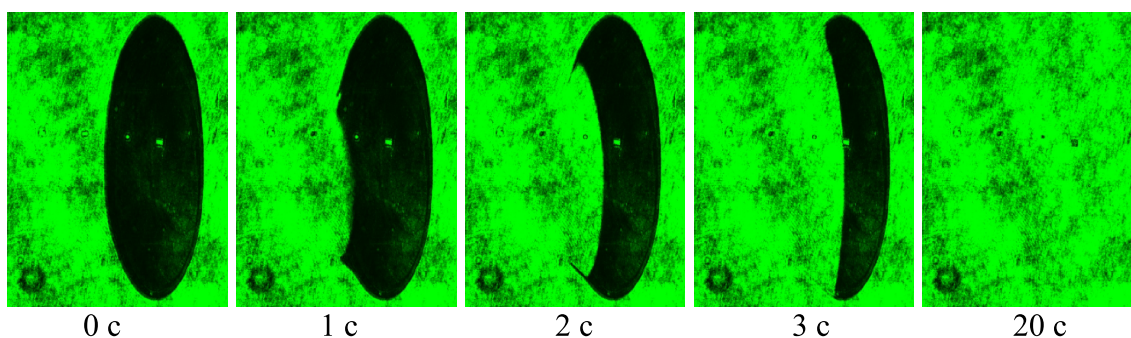


Рис. 9. Результаты эксперимента по визуализации перемешивания капли воды и капли глицерина

На первом изображении на рис. 9 видно темное изображение капли воды, так как для нее настроен угол ППР. Капля глицерина невидима на этих изображениях, так как для нее условие ППР не соблюдается и она практически не меняет коэффициент отражения (по крайней мере, это незаметно невооруженным глазом). По мере перемешивания капля показатель преломления смеси принимает промежуточное значение между показателем преломления воды и глицерина, причем смесь тоже невидима на приведенных изображениях. Поэтому мы можем наблюдать как бы поглощение темной капли невидимой, хотя, конечно, на самом деле обе они прозрачны. Возможно подобрать такие условия эксперимента, при которых обе жидкости меняют коэффициент отражения, но по-разному, и, следовательно, обе капли выглядят серыми разных оттенков. Этот случай более информативен с точки зрения получения количественных характеристик исследуемого процесса, но менее нагляден, поэтому мы не приводим его в этой работе.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе были использованы рефракционный и интерференционный методы, а также методы нарушенного полного внутреннего отражения и поверхностного плазмонного резонанса для комплексного исследования параметров капли жидкости на горизонтальной

подложке. Рефракционный метод визуализации микроструктур на поверхности капли жидкости позволяет на основе анализа изображений восстанавливать характерные параметры микрорельефа в области линии трехфазного контакта, измерять значения краевого угла и наблюдать динамику деформаций контура контактной поверхности. Метод НПВО позволяет регистрировать динамику изменения площади пятна контакта в случае испарения или растекания капли жидкости на подложке. Интерференционный метод позволяет визуализировать форму поверхности капли в процессе испарения. Метод ППР позволяет определять распределение показателя преломления в тонком пограничном слое капли.

БЛАГОДАРНОСТИ

Работа выполнена при частичной финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект № 16-32-00530-мол_а) и стипендии Президента Российской Федерации молодым ученым и аспирантам, осуществляющим перспективные научные исследования и разработки по приоритетным направлениям модернизации российской экономики на 2015-2017 годы.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Borodin S.A., Volkov A.V., Kazanskiĭ N.L.** Device for analyzing nanoroughness and contamination on a substrate from the dynamic state of a liquid drop deposited on its surface // J. Opt. Technol. 2009. Т. 76. С. 408-412.
2. **Vinogradova O.I., Belyaev A.V.** Wetting, roughness and flow boundary conditions // J. Phys.: Condens. Matter. 2011. Т. 23, № 18. С. 184104.
3. **Михалев А.С., Скорнякова Н.М.** Рефракционная система для исследования испарения капель жидкости с твердой поверхности // Метрология. 2010. № 11. С. 22-29.
4. **Дерягин Б.В.** О Зависимости краевого угла от микрорельефа или от шероховатости смачиваемой поверхности // ДАН СССР. 1946. Т. 51. № 7. С. 357-360.
5. **Сумм Б.Д., Горюнов Ю.В.** Физико-химические основы смачивания и растекания. М.: Химия, 1976. 231 с.
6. **Матюхин С.И., Фроленков К.Ю.** Форма капель жидкости, помещенных на твердую горизонтальную поверхность // Конденсированные среды и межфазные границы. 2013. Т. 15. № 3. С. 292-304.
7. **Del Rio O.I., Kwok D.Y., Wu R., Alvarez J.M., Neumann A.W.** Contact angle measurements by axisymmetric drop shape analysis and an automated polynomial fit program // Colloids Surf. A. 1998. Т. 143. С. 197-210.
8. **Bateni A., Susnar S.S., Amirfazli A., Neumann A.W.** A high-accuracy polynomial fitting approach to determine contact angles // Colloids Surf. A. 2003. Т. 219. С. 215-231.
9. **Stalder A.F., Kulik G., Sage D., Barbieri L., Hoffmann P.** A snake-based approach to accurate determination of both contact points and contact angles // Colloids Surf. A. 2006. Т. 286. С. 92-103.
10. **Pavlov I.N., Raskovskaya I.L., Rinkevichyus B.S., Tolkachev A.V.** Visualization of liquid droplets on a transparent horizontal surface // 10th Pacific Symposium on Flow Visualization and Image Processing. 15-18 июня 2015, Неаполь, Италия. Доклад 256.
11. **Павлов И.Н., Ринкевичюс Б.С., Толкачев А.В.** Лазерный визуализатор неоднородности пристеночных слоев жидкости // Измерительная техника. 2010. №10. С. 33-35.
12. **Павлов И.Н., Ринкевичюс Б.С., Толкачев А.В.** Экспериментальная визуализация физических процессов в каплях прозрачных жидкостей // Научная визуализация. 2014. Т. 6. №3. С. 1-13.
13. **Павлов И.Н., Расковская И.Л., Толкачев А.В.** Структура микрорельефа поверхности испаряющейся с шероховатой подложки капли как возможная причина гистерезиса краевого угла // ЖЭТФ. 2017. Т. 151. №4. С. 670-681.

14. Павлов И.Н., Ринкевичюс Б.С., Толкачев А.В., Ведяшкина А.В. Возможности метода поверхностного плазмонного резонанса для визуализации физических процессов в наноразмерных пограничных слоях жидкости // Научная визуализация. 2017. Т. 9. № 1. С. 41-49.
15. Павлов И.Н., Расковская И.Л., Ринкевичюс Б.С. Экспериментальная визуализация и моделирование микроструктур на поверхности капли жидкости // Труды 26-ой Международной научной конференции GraphiCon2016 (19-23 сентября 2016, Нижний Новгород, Россия). Издательство ННГАСУ, 2016. С. 319-322.

I.N. Pavlov, I.L. Raskovskaya, B.S. Rinkevichyus, A.V. Tolkachev
National Research University "MPEI", Russia,
111250, Moscow, Krasnokazarmennaya st., 14, E-mail: inpavlov@bk.ru

COMPREHENSIVE INVESTIGATION OF EVAPORATION OF LIQUID DROPLET FROM ROUGH SUBSTRATE BY MEANS OF LASER METHODS

The results of investigation of the parameters of a liquid droplet evaporating from rough substrate by means of several optical methods (refractive, interference, frustrated total internal reflection and surface plasmon resonance) are described in the paper. Description of calculation methods, principles of experimental methods and setups based on it and also results of experimental image processing are given. Dynamics of the variation of a contact angle and microstructure of surface relief of a droplet are visualized with help of refractive method by using laser sheet and wide collimated laser beam. The shape of a droplet surface and rate of evaporation are determined in case of interference method. And the processes in a thin boundary layer of droplet are investigated by means of frustrated total internal reflection method and surface plasmon resonance method.

DROPLET, REFRACTION, LASER SHEET, WIDE LASER BEAM, FRUSTRATED TOTAL INTERNAL REFLECTION, SURFACE PLASMON RESONANCE