

## ЛАЗЕРНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ ВИЗУАЛИЗАЦИИ И МОНИТОРИНГА ДИНАМИКИ ФОРМЫ КАПЕЛЬ И ПЛЕНОК ЖИДКОСТИ НА ТВЕРДОЙ ПОВЕРХНОСТИ

**И.Н. Павлов**, доц. НИУ «МЭИ», канд. техн. наук, доц., [inpavlov@bk.ru](mailto:inpavlov@bk.ru)

**И.Л. Расковская**, проф. НИУ «МЭИ», д-р техн. наук, доц., [raskovskail@mail.ru](mailto:raskovskail@mail.ru)

**С.П. Юркевичюс**, вед. науч. сотр. ФГБНУ НИИ РИНКЦЭ, канд. техн. наук, доц., [jursp@extech.ru](mailto:jursp@extech.ru)

Рецензент: Г.С. Евтушенко, ФГБНУ НИИ РИНКЦЭ, д-р. техн. наук, [evt@tpu.ru](mailto:evt@tpu.ru)

*Представлен обзор оригинальных лазерных методов, применяемых для исследования параметров капли или пленки жидкости, испаряющейся на твердой поверхности. Описаны результаты, полученные с помощью нескольких оптических методов: рефракционного, интерференционного, нарушенного полного внутреннего отражения и поверхностного плазмонного резонанса. Приведено описание экспериментальных установок, методик проведения экспериментов и обработки полученных изображений. Рефракционным методом с использованием плоского и широкого коллимированного пучка визуализировались микроструктура рельефа поверхности пленки жидкости, динамика изменения краевого угла и объема 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.*

**Ключевые слова:** капля, рефракция, интерференция, лазерный пучок, нарушенное полное внутреннее отражение, поверхностный плазмонный резонанс.

## LASER TECHNOLOGIES FOR VISUALIZATION AND MONITORING OF THE SHAPE DYNAMICS OF LIQUID DROPLETS AND FILMS ON A SOLID SURFACE

**I.N. Pavlov**, Associate Professor, NRU «MPEI», Doctor of Engineering, Assistant Professor, [inpavlov@bk.ru](mailto:inpavlov@bk.ru)

**I.L. Raskovskaya**, Professor, NRU «MPEI», Ph. D., Assistant Professor, [raskovskail@mail.ru](mailto:raskovskail@mail.ru)

**S.P. Yurkevichyus**, Leading Researcher, SRI FRCEC, Doctor of Engineering, Assistant Professor, [jursp@extech.ru](mailto:jursp@extech.ru)

*An overview of the original laser methods used to study the parameters of a drop or film of liquid evaporating on a solid surface is presented. The results obtained using several optical methods are described: refractive, interference, disturbed total internal reflection and surface plasmon resonance. The description of experimental installations, methods of conducting experiments and processing the obtained images is given. The microstructure of the surface relief of the liquid film, the dynamics of changes in the marginal angle and volume of the droplet were visualized by the refractive method using a flat and wide collimated beam, the shape of the surface was visualized by the interference method and the evaporation rate of the droplet was determined, the processes in the thin lower boundary layer of the droplet lying on a transparent substrate were studied by the methods of disturbed total internal reflection and surface plasmon resonance.*

**Keywords:** drop, refraction, interference, laser beam, disturbed total internal reflection, surface plasmon resonance.

## **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 др. Например, в [1] описывается устройство для анализа наносероховатостей и загрязнений подложки по динамическому состоянию капли жидкости, наносимой на ее поверхность. Оно применяется для экспресс-контроля степени чистоты поверхности подложек, предназначенных для формирования микрорельефа дифракционных оптических элементов. В [2] обсуждается, как смачиваемость и шероховатость поверхностей тел влияют на их гидродинамические свойства.

Исследованию формы капли при испарении также посвящено немало работ. Например, в [3] описана рефракционная система для исследования испарения капель жидкости, основанная на теневом фоновом методе визуализации оптически неоднородных сред. В [4] скорость испарения капли экспериментально определяется лазерным рефракционным методом. В указанной работе лазерный рефракционный метод используется для исследования динамики изменения высоты, краевого угла смачивания и объема капли от времени в процессе испарения в режиме пиннинга (фиксированного положения) контактной линии. Анализ публикаций, посвященных этой проблеме [5–9], показывает, что, несмотря на большой интерес исследователей и разработку новых методик измерения параметров капли при различных режимах испарения, на текущий момент остается еще много нерешенных вопросов. Кроме того, реальные поверхности практически всегда являются шероховатыми или загрязненными, что сказывается на форме капель, помещенных на такие поверхности.

В ряде работ [10–12] 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 ее геометрических параметров. Однако создание единой модели в данной ситуации, очевидно, затруднено из-за многообразия факторов, влияющих на форму капли. В связи с вышесказанным представляется актуальной разработка экспериментальных методик 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 рефракционных 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 можно использовать плоские лазерные пучки [13], позволяющие восстанавливать значения функции уровня поверхности в дискретном наборе сечений капли с последующей реконструкцией и компьютерной визуализацией ее глобального и микрорельефа.

С помощью метода нарушенного полного внутреннего отражения (НПВО) широкого коллимированного лазерного пучка [14] 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, толщина которого составляет несколько сотен нанометров. Чтобы расширить диапазон измеряемых параметров капли с помощью создан-

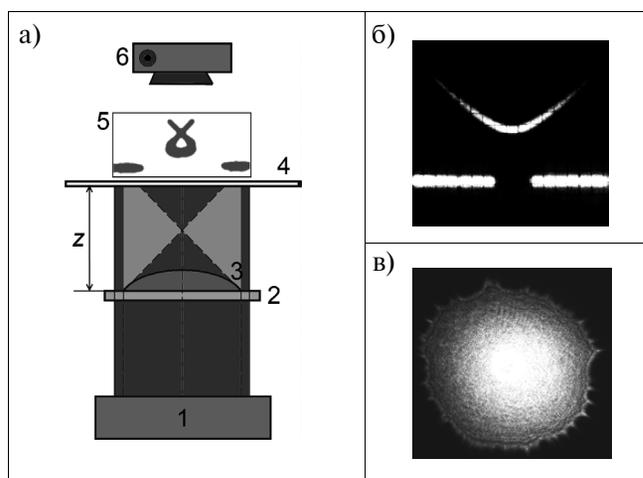
ной экспериментальной установки, был разработан новый метод, позволяющий определять форму поверхности капли, лежащей на горизонтальной подложке, на основе полученных интерференционных картин [15].

Метод поверхностного плазмонного резонанса (ППР) [16] также относится к оптическим методам диагностики тонкого (порядка нескольких сотен нанометров) пограничного слоя исследуемой среды. Изменение показателя преломления среды может быть обусловлено изменением ее температуры, фазового состава (образования, например, льда или пузырьков газа в воде), концентрации определенных веществ в растворителе и т.д. Зная зависимость показателя преломления от изменяющегося параметра, можно определить величину этого параметра в соответствующем месте пограничного слоя.

### Рефракционные методики

В данной работе лазерные рефракционные технологии использовались для мониторинга динамики изменения высоты, краевого угла смачивания и объема капли от времени в процессе испарения в режиме пиннинга (фиксированного положения) линии трехфазного контакта (ЛТК).

Одной из возможных рефракционных методик является послойное зондирование капли жидкости на твердой подложке вертикальным направленным плоским лазерным пучком [17], что позволяет по рефракционным изображениям восстанавливать значения функции уровня поверхности в дискретном наборе сечений капли с последующей интерполяцией. Разработанные в [18–23] методы решения обратных задач рефракции при зондировании оптической неоднородности плоскими пучками могут быть модифицированы и применены для восстановления профиля поверхности прозрачной среды. Схема установки и характерные изображения представлены на рис. 1.



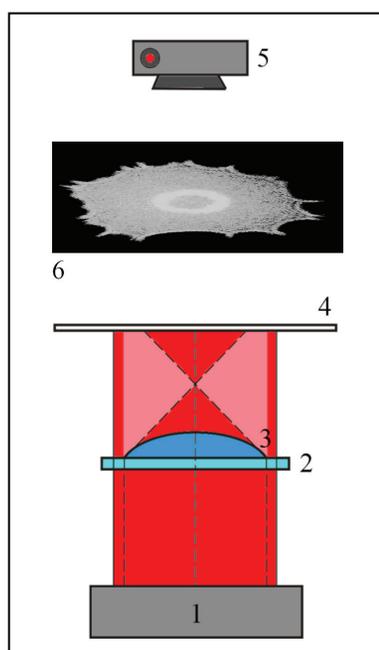
**Рис. 1. Схема установки (а) и характерные изображения при зондировании капли плоским (б) и широким (в) пучками:**

1 – система формирования зондирующего лазерного пучка (плоского или широкого коллимированного); 2 – стеклянная подложка; 3 – исследуемая капля; 4 – экран; 5 – врезка, иллюстрирующая получаемое на экране изображение рефрагированного плоского пучка; 6 – цифровая камера

Кроме того, самостоятельный интерес имеют явления задержки и смещения контактной линии, имеющие место при испарении капли и сопровождающиеся изменением локальных значений краевого угла и микрорельефа как во времени, так и вдоль контактной линии.

В работе [22] сделана попытка объяснить существование некоторого диапазона возможных углов смачивания и скачкообразный характер деформации линии трехфазного контакта (ЛТК) при испарении капли с точки зрения структуры микрорельефа поверхности капли в области ЛТК.

Для количественного анализа наблюдаемых при испарении капли явлений в работе была использована экспериментальная методика, позволяющая на основе анализа рефракционных изображений восстанавливать характерные параметры глобального рельефа капли и микрорельефа в области контактной линии, измерять значения краевого угла и наблюдать динамику деформаций ЛТК. С этой целью была создана экспериментальная установка, схема которой изображена на рис. 2. В ней применялось вертикальное зондирование капли на прозрачной подложке широким коллимированным лазерным пучком. Примерно через 10 с после нанесения капли на шероховатую поверхность формировались характерные рефракционные изображения б.

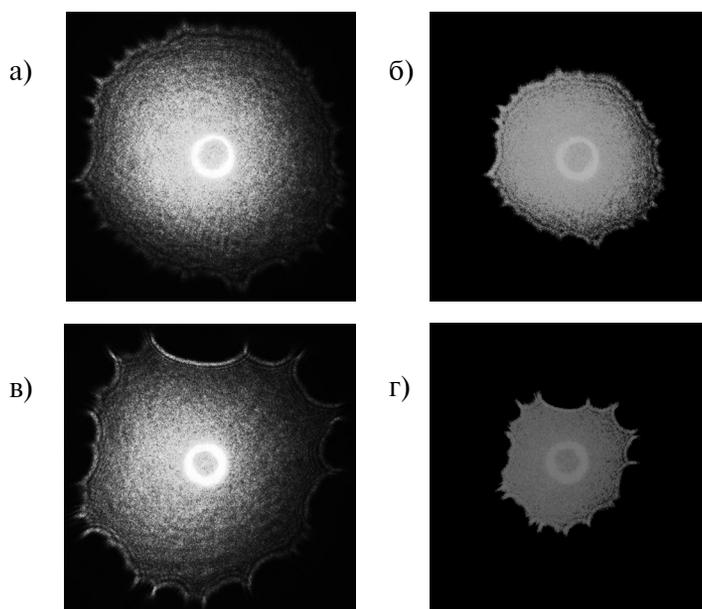


**Рис. 2. Схема установки для рефракционного метода:**

1 – система формирования зондирующего пучка, 2 – прозрачная подложка,  
3 – исследуемая капля, 4 – экран, 5 – цифровая камера, 6 – пример  
полученного изображения

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, особенности изображения будут проявляться там, где луч

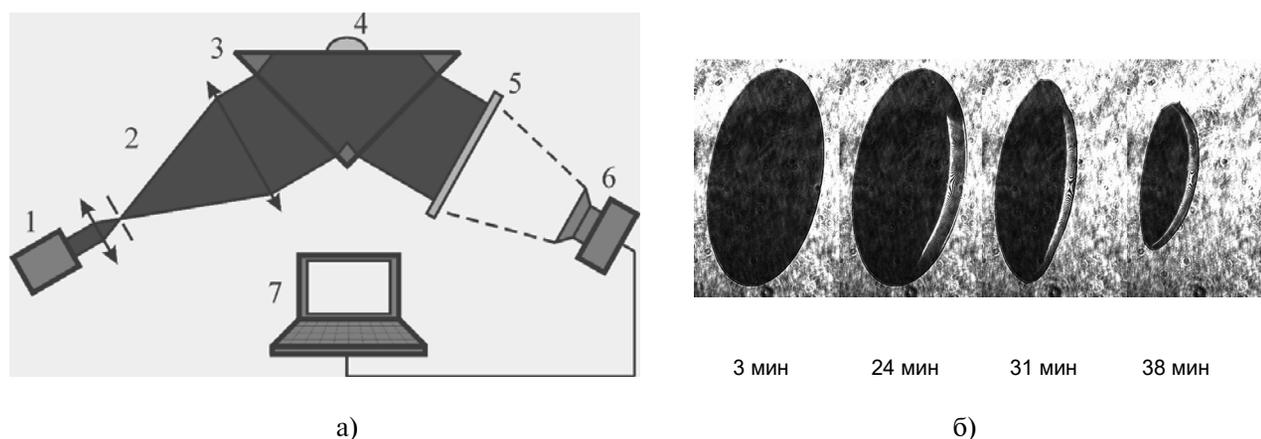
является асимптотическим для поверхности препятствия, т. е. в точках перегиба. Такие лучи образуют ребро возврата, которое визуализируется как каустика. Таким образом, яркий контур изображения представляет собой участки каустик, образующихся при наличии линий перегиба на поверхности капли вблизи линии контакта. Анализ рефракционных изображений, представленных на рис. 3, и их моделирование позволили сделать вывод о том, что радиус контура рефракционного изображения определяется локальным значением соответствующего угла смачивания. Моделирование формы капли и изменение ее с течением времени позволило вычислить скорость испарения жидкости [4].



**Рис. 3. Характерные экспериментальные изображения, полученные с помощью рефракционного метода при зондировании капли широким коллимированным пучком:**  
 а, б – шероховатость поверхности 2 нм; в, г – шероховатость поверхности 10 нм.  
 Изображения в парах отличаются временем регистрации в процессе испарения капли

### Метод нарушенного полного внутреннего отражения

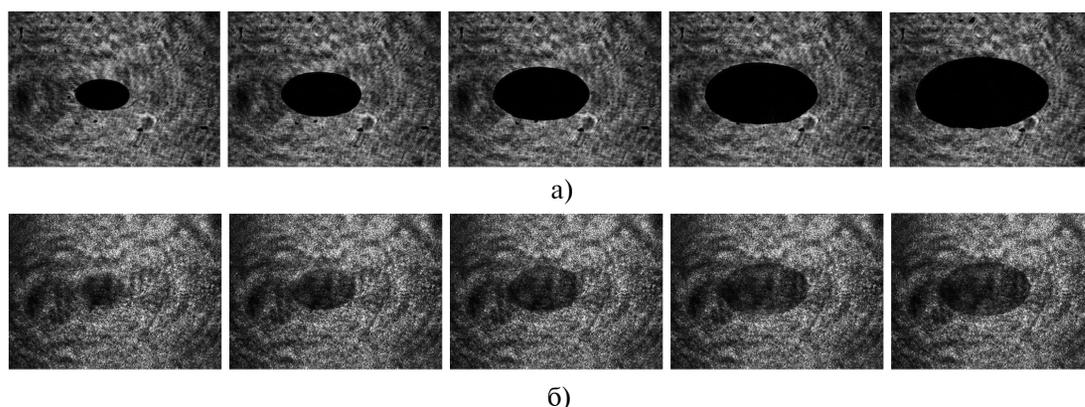
Схема экспериментальной установки [14] для реализации метода НПВО представлена на рис. 4. Лежащая на поверхности измерительной призмы с показателем преломления  $n_1$  капля ( $n_2$ ) свободно испаряется в окружающее пространство – воздух ( $n_3$ ). Поверхность призмы освещается широким параллельным лазерным пучком, падающим под углом  $\theta_i$ , 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. 4. Схема экспериментальной установки для реализации метода НПВО и визуализация контактного пятна:**

- а) 1 – лазер; 2 – расширитель пучка; 3 – призма; 4 – капля;  
 5 – экран; 6 – ПЗС-камера; 7 – компьютер;  
 б) изображения испаряющейся капли дистиллированной воды

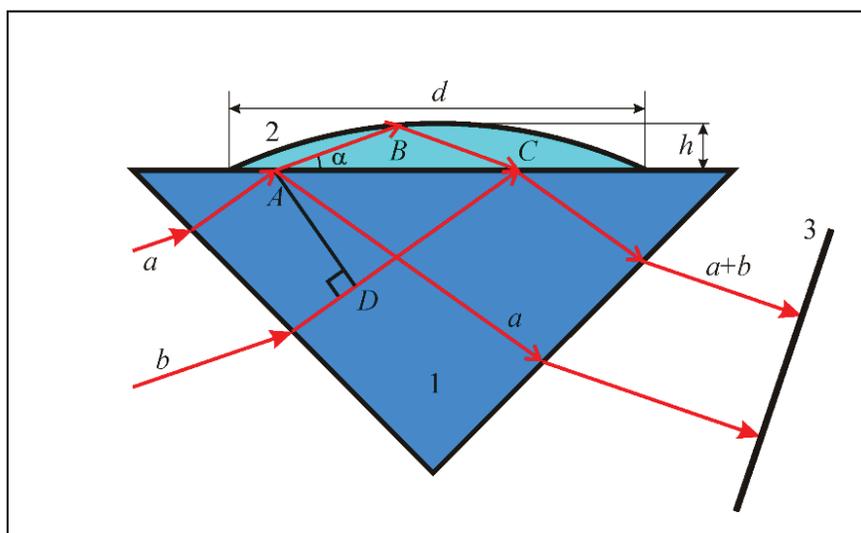
На основе метода НПВО разработана методика и проведены экспериментальные исследования процесса растекания капли на поверхностях с разными шероховатостями. В качестве таких поверхностей использовались основания призм, обработанные шлифовальными порошками с различным размером зерен: М-28, М-14 и М-7. Предметом исследования являлось динамическое состояние капли жидкости после ее попадания на поверхность подложки. 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. 5а, а на рис. 5б – для растекания капли по поверхности призмы, обработанной порошком М-7.



**Рис. 5. Растекание капли воды по поверхностям с разными шероховатостями:**  
 а – гладкой; б – шероховатой

### 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. 6. В результате получается интерференционная картина, схожая с кольцами Ньютона. Так как при испарении форма поверхности и высота капли непрерывно меняются, 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. 6. Пути интерферирующих лучей а и б в капле жидкости, помещенной на поверхность призмы:**

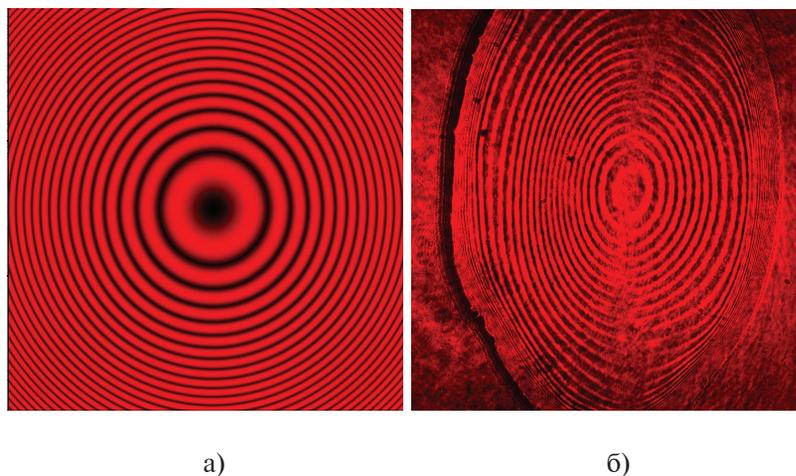
1 – призма; 2 – капля жидкости; 3 – экран

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. 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»:

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

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

На рис. 7а приведена интерференционная картина, полученная в результате моделирования по приведенной выше формуле, а на рис. 7б — 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.



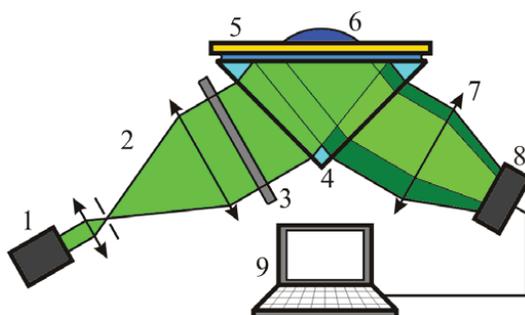
**Рис. 7. Расчетная (а) и экспериментальная (б) интерференционные картины для испаряющейся капли дистиллированной воды**

### Метод поверхностного плазмонного резонанса

Как известно, поверхностные плазмоны — это колебания плотности свободных электронов на поверхности металла, возбуждаемые внешним воздействием, обычно эванесцентной волной, образующейся при полном внутреннем отражении поляризованного света внутри стеклянной призмы. При определенных условиях (обеспечение нужных значений толщины металлической пленки, длины волны, состояния поляризации и угла падения возбуждающего света, соотношения показателей преломления стеклянной призмы, металла и исследуемой среды) возникает так называемый поверхностный плазмонный резонанс, при котором, несмотря на выполнение условия полного внутреннего отражения, интенсивность отраженного излучения равна нулю. При отклонении любого из параметров, например показателя преломления среды, от резонансного значения эффективность генерации поверхностных плазмонов падает, и появляется отраженный свет, что и является сигналом нарушения резонансных условий. Таким образом, если использовать в качестве возбуждающего света широкий коллимированный лазерный пучок, то на экране в отраженном свете можно наблюдать изменение показателя преломления среды по изменению интенсивности падающего на экран света.

Схема установки, работающей на основе метода поверхностного плазмонного резонанса (ППР) [16], показана на рис. 8. 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

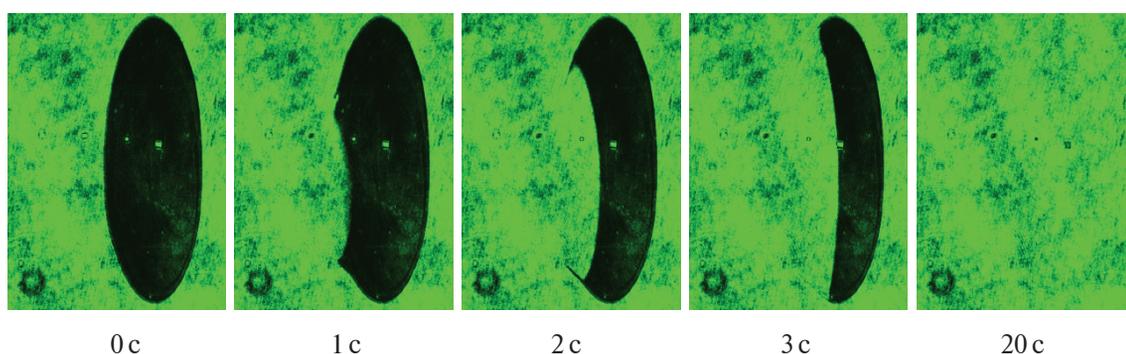
света равняется нулю, так как вся энергия падающего света расходуется на генерацию поверхностных плазмонов. При отклонении одного из параметров (например, показателя преломления жидкости в пограничном слое) от резонансного значения интенсивность в соответствующем месте изображения становится отличной от нуля, и по ее величине можно судить о количественном значении отклонения параметра.



**Рис. 8. 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

На собранной по приведенной выше (см. рис. 8) 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.

### **Обсуждение**

Как указано выше, создание единой теоретической модели капель или пленок жидкости на твердой поверхности, очевидно, затруднено из-за многообразия факторов, влияющих на их физические параметры, и в частности на форму поверхности. Поэтому были проведены разработка и реализация ряда экспериментальных методик визуализации и реконструкции рельефа поверхности капли и других ее параметров.

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.

Характерной особенностью проведенного исследования является его комплексный характер, позволяющий детально исследовать динамику объектов в широком диапазоне температур при наличии фазовых переходов и скачкообразном изменении формы и перемешивании капель, а также осуществлять одновременно визуализацию и количественную диагностику исследуемых параметров.

Кроме того, информация о свойствах и состоянии поверхностей на межфазных границах лежит в основе ряда современных технологий, поэтому поверхностные явления представляют собой в настоящее время один из самых актуальных объектов исследования. Очевидно, микронеоднородности поверхности в месте своей локализации будут влиять на краевые углы смачивания, поэтому значения локальных углов смачивания и параметры микрорельефа поверхности капли в области контактной линии могут служить информативными параметрами при определении количественных характеристик поверхности твердой подложки.

### **Выводы**

В результате проведенного исследования получены следующие основные результаты.

Разработана экспериментальная методика восстановления профиля поверхности капли жидкости на горизонтальной твердой подложке с использованием рефракционных изображений, полученных при послойном лазерном зондировании. Приведены примеры типичных расчетных и экспериментальных изображений, решена обратная задача рефракции, восстановлена глобальная форма поверхности капли.

На основе рефракционных изображений испаряющейся на шероховатой подложке капли одновременно вдоль всего периметра линии контакта наблюдалась динамика микрорельефа ее поверхности, краевого угла и деформаций контактной линии, что позволило сделать вывод о непосредственной связи структуры микрорельефа с явлением гистерезиса краевых углов и скачкообразным характером деформации линии контакта. Предложен возможный механизм

возникновения гистерезиса угла смачивания при испарении капли, получены соотношения, определяющие диапазон возможных краевых углов при известных параметрах микрорельефа.

Разработан и реализован лазерный рефракционный метод измерения скорости испарения капли жидкости на горизонтальной подложке в условиях пиннинга контактной линии. С использованием рефракционных изображений получены экспериментальные значения краевого угла смачивания в процессе испарения капли, на основе которых восстановлена зависимость объема испаряющейся капли от времени.

Для верификации формы поверхности капли был использован интерференционный метод, позволяющий проводить мониторинг скорости испарения капли.

Создана установка для визуализации фазовых переходов в пограничном слое жидкости. При проведении экспериментов визуализации процесса кристаллизации капли дистиллированной воды на поверхности элемента Пельтье с помощью метода нарушенного полного внутреннего отражения широкого лазерного пучка была исследована динамика фазовых переходов.

Описаны принципы метода поверхностного плазмонного резонанса, рассмотрены возможные перспективы использования этого метода для визуализации и количественной диагностики физических процессов в пристеночном слое жидкости. С помощью созданной установки были проведены исследования процессов растекания, испарения, нагревания, охлаждения, кристаллизации и перемешивания капель жидкостей на поверхности стеклянной пластинки с металлическим напылением.

Комплексное использование указанных лазерных экспериментальных технологий позволяет осуществлять визуализацию и мониторинг динамики формы капель и пленок жидкости на твердой поверхности.

### **Список литературы**

1. Borodin S.A., Volkov A.V., Kazanski 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. Skornyakova N., Tropea C. BOS visualization of levitated drop evaporation // *Optical methods of flow investigations: Proc. 9th sci. tech. conf. M.: MPEI, 2007. P. 234–237.*
4. Павлов И.Н., Расковская И.Л., Юркевичус С.П. Рефракционный метод измерения скорости испарения капли жидкости в условиях пиннинга контактной линии // *Измерительная техника.* 2018. № 6. С. 52–55.
5. Dhavaleswarapu H.K., Migliaccio C.P., Garimella S.V., Murthy J.Y. Experimental Investigation of Evaporation from Low-Contact-Angle Sessile Droplets // *Langmuir.* 2010. Vol. 26. Issue 2. P. 880–888.
6. Gunay A.A., Sett S., Oh J., Miljkovich N. Steady method for the analysis of evaporation dynamics // *Langmuir.* 2017. Vol. 33. Issue 43. P. 12007–12015.
7. Saverchenko V.I., Fisenko S.P., Khodyko Yu.A. Kinetics of picoliter binary droplet evaporation on a substrate at reduced pressure // *Colloid Journal.* 2015. Vol. 77. No. 1. P. 71–76.
8. Bhardwaj R., Longtin J.P., Attinger D. Interfacial temperature measurements, high-speed visualization and finite-element simulations of droplet impact and evaporation on a solid surface // *Int. J. of Heat and Mass Transf.* 2010. Vol. 53. P. 3733–3744.
9. Schweigler K.M., Ben Said M., Seifritz S., Selzer M., Nestler B. Experimental and numerical investigation of drop evaporation depending on the shape of the liquid/gas interface // *Int. J. of Heat and Mass Transfer.* 2017. Vol. 105. P. 655–663.
10. 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.

11. 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.
12. 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.
13. 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 June 2015, Naples, Italy. P. 256.
14. Павлов И.Н., Ринкевичюс Б.С., Толкачев А.В. Лазерный визуализатор неоднородности пристеночных слоев жидкости // *Измерительная техника*. 2010. №10. С. 33–35.
15. Pavlov I.N., Raskovskaya I.L., Rinkevichyus B.S., Tolkachev A.V. Many-sided investigation of a liquid droplet lying on a substrate by different optical techniques. *Progress in Electromagnetics Research Symposium*. 2017. P. 750–753.
16. 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.
17. Павлов И. Н., Расковская И. Л., Ринкевичюс Б.С. Восстановление профиля поверхности капли жидкости на основе послыного лазерного зондирования // *Письма в ЖТФ*. 2017. Т. 43. № 13. С. 19–25.
18. Rinkevichyus B.S., Evtikhieva O.A., Raskovskaya I.L. *Laser refractography*. 2010. N.Y.: Springer. P. 1–189.
19. Krikunov A.V., Raskovskaya I.L., Rinkevichyus B.S. Refraction of an astigmatic laser beam in a transition layer of a stratified liquid // *Optics and Spectroscopy*. 2011. Vol. 111. № 6. С. 956–961.
20. Расковская И.Л., Сергеев Д.А., Ширинская Е.С. Диагностика характеристик солестратифицированной жидкости методом лазерной рефрактографии // *Измерительная техника*. 2010. № 10. С. 36–38.
21. Расковская И.Л. Лазерная диагностика неоднородных жидких сред в условиях существенной рефракции: дис. д-ра техн. наук / ФГБОУ «НИУ «МЭИ», 2022.
22. 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.
23. Павлов И.Н., Расковская И.Л., Юркевичюс С.П., Гриценко А.Е. Информационно-измерительные лазерные технологии диагностики оптически неоднородных жидких сред в условиях сильной рефракции // *Инноватика и экспертиза*. 2023. № 1 (35). С. 83–91.

## References

1. Borodin S.A., Volkov A.V., Kazanskiy N.L. (2009) Device for analyzing nanoroughness and contamination on a substrate from the dynamic state of a liquid drop deposited on its surface. *J. Opt. Technol.* Vol. 76. P. 408–412.
2. Vinogradova O.I., Belyaev A.V. (2011) Wetting, roughness and flow boundary conditions. *J. Phys.: Condens. Matter*. Vol. 23. No. 18. P. 184104.
3. Skorniyakova N., Tropea C. (2007) BOS visualization of levitated drop evaporation. *Optical methods of flow investigations: Proc. 9th sci. tech. conf. MPEI. Moscow*. P. 234–237.
4. Pavlov I.N., Raskovskaya I.L., Yurkevicius S.P. (2018) *Refraktsionnyy metod izmereniya skorosti ispareniya kapli zhidkosti v usloviyakh pinninga kontaktnoy linii* [Refractive method for measuring the evaporation rate of a liquid drop under pinning conditions of a contact line] *Izmeritel'naya tekhnika* [Measuring technique]. No. 6. P. 52–55.
5. Dhavaleswarapu H.K., Migliaccio C.P., Garimella S.V., Murthy J.Y. (2010) Experimental Investigation of Evacuation from Low-Contact-Angle Sessile Droplets. *Langmuir*. Vol. 26. Issue 2. P. 880–888.
6. Gunay A.A., Sett S., Oh J., Miljkovich N. (2017) Steady method for the analysis of evaporation dynamics. *Langmuir*. Vol. 33. Issue 43. P. 12007–12015.

7. Saverchenko V.I., Fisenko S.P., Khodyko Yu.A. (2015) Kinetics of picoliter binary droplet evaporation on a substrate at reduced pressure. *Colloid Journal*. Vol. 77. No. 1. P. 71–76.
8. Bhardwaj R., Longtin J.P., Attinger D. (2010) Interfacial temperature measurements, high-speed visualization and finite-element simulations of droplet impact and evaporation on a solid surface. *Int. J. of Heat and Mass Transf.* 2010. Vol. 53. P. 3733–3744.
9. Schweigler K.M., Ben Said M., Seifritz S., Selzer M., Nestler B. (2017) Experimental and numerical investigation of drop evaporation depending on the shape of the liquid/gas interface. *Int. J. of Heat and Mass Transfer*. Vol. 105. P. 655–663.
10. Del Rio O.I., Kwok D.Y., Wu R., Alvarez J.M., Neumann A.W. (1998) Contact angle measurements by axisymmetric drop shape analysis and an automated polynomial fit program. *Colloids Surf. A*. Vol. 143. P. 197–210.
11. Bateni A., Susnar S.S., Amirfazli A., Neumann A.W. (2003) A high-accuracy polynomial fitting approach to determine contact angles. *Colloids Surf. A*. Vol. 219. P. 215–231.
12. Stalder A.F., Kulik G., Sage D., Barbieri L., Hoffmann P. (2006) A snake-based approach to accurate determination of both contact points and contact angles. *Colloids Surf. A*. Vol. 286. P. 92–103.
13. Pavlov I.N., Raskovskaya I.L., Rinkevichyus B.S., Tolkachev A.V. (2015) Visualization of liquid droplets on a transparent horizontal surface. 10th Pacific Symposium on Flow Visualization and Image Processing. 15–18 June. Naples. Italy. P. 256.
14. Pavlov I.N., Rinkevicius B.S., Tolkachev A.V. (2010) *Lazernyy vizualizator neodnorodnosti pristenochnykh sloev zhidkosti* [Laser visualizer of inhomogeneity of wall layers of liquid] *Izmeritel'naya tekhnika* [Measuring equipment]. No. 10. P. 33–35.
15. Pavlov I.N., Raskovskaya I.L., Rinkevichyus B.S., Tolkachev A.V. (2017) Many-sided investigation of a liquid droplet lying on a substrate by different optical techniques. *Progress in Electromagnetics Research Symposium*. P. 750–753.
16. Pavlov I.N., Rinkevicius B.S., Tolkachev A.V., Vedyashkina A.V. (2017) *Vozmozhnosti metoda poverkhnostnogo plazmonnogo rezonansa dlya vizualizatsii fizicheskikh protsessov v nanorazmernykh pogranichnykh sloyakh zhidkosti* [Possibilities of the surface plasmon resonance method for visualization of physical processes in nanoscale boundary layers of liquid] *Nauchnaya vizualizatsiya* [Scientific visualization]. Vol. 9. No. 1. P. 41–49.
17. Pavlov I.N., Raskovskaya I.L., Rinkevicius B.S. (2017) *Vosstanovlenie profilya poverkhnosti kapli zhidkosti na osnove posloynnogo lazernogo zondirovaniya* [Restoration of the surface profile of a liquid drop based on layer-by-layer laser sensing] *Pis'ma v ZhTF* [Letters to ZhTF]. Vol. 43. No. 13. P. 19–25.
18. Rinkevichyus B.S., Evtikhieva O.A., Raskovskaya I.L. (2010) *Laser refractography*. Springer. N.Y. P. 1–189.
19. Krikunov A.V., Raskovskaya I.L., Rinkevichyus B.S. (2011) Refraction of an astigmatic laser beam in a transition layer of a stratified liquid. *Optics and Spectroscopy*. Vol. 111. No. 6. P. 956–961.
20. Raskovskaya I.L., Sergeev D.A., Shirinskaya E.S. (2010) *Diagnostika kharakteristik solestratifikirovannoy zhidkosti metodom lazernoy refraktografii* [Diagnostics of characteristics of a solestrated liquid by laser refractography] *Izmeritel'naya tekhnika* [Measuring technique]. No. 10. P. 36–38.
21. Raskovskaya I.L. (2022) *Lazernaya diagnostika neodnorodnykh zhidkikh sred v usloviyakh sushchestvennoy refraktsii* [Laser diagnostics of inhomogeneous liquid media under conditions of substantial refraction] *Dis. d-ra tekhn. Nauk* [Diss. of Doctor of Technical Sciences] *FGBOU «NIU «MEI»* [FSUE «NIU «MEI»].
22. Pavlov I.N., Raskovskaya I.L., Tolkachev A.V. (2017) *Struktura mikrorel'efa poverkhnosti isparuyushchey s sherokhovatoy podlozhki kapli kak vozmozhnaya prichina gisterezisa kraevogo ugla* [The structure of the microrelief of the surface of a drop evaporating from a rough substrate as a possible cause of the hysteresis of the marginal angle] *ZhETF* [JETP]. Vol. 151. No. 4. P. 670–681.
23. Pavlov I.N., Raskovskaya I.L., Yurkevicius S.P., Gritsenko A.E. (2023) *Informatsionno-izmeritel'nye lazernye tekhnologii diagnostiki opticheski neodnorodnykh zhidkikh sred v usloviyakh sil'noy refraktsii* [Information-measuring laser technologies for diagnostics of optically inhomogeneous liquid media in conditions of strong refraction] *Innovatika i ekspertiza* [Innovation and Expert Examination]. No. 1 (35). P. 83–91.