

# Экспериментальная визуализация и моделирование микроструктур на поверхности капли жидкости\*

*И.Н. Павлов, И.Л. Расковская, Б.С. Ринкевичюс*  
inpavlov@bk.ru | raskovskail@mail.ru | rinkevbs@mail.ru  
Институт ИПМ им. М.В. Келдыша РАН, Москва, Россия

*На основе рефракционных изображений испаряющейся на прозрачной шероховатой подложке капли при вертикальном зондировании плоским и широким коллимированным лазерным пучком визуализировалась динамика изменения краевых углов и микроструктуры рельефа в области линии контакта. При моделировании было установлено, что одинаковые рефракционные изображения могут наблюдаться при двух различных типах микрорельефа поверхности капли. В результате решения обратной задачи рефракции восстановлены параметры глобального рельефа и микроструктур на поверхности капли и осуществлена их компьютерная визуализация.*

**Ключевые слова:** микроструктуры поверхности, капли, рефракция, эксперимент, моделирование

## 1. Введение

Классическая теория явлений на межфазных границах [Дерягин 1946, Сумм 1976], 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 [Матюхин 2013], 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 [Del Rio 1998, Bateni 2003, Stalder 2006] 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 [Матюхин 2013], 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 предлагаемой методики является использование для визуализации микронеоднородностей рельефа поверхности широких лазерных пучков, позволяющих получать рефракционные изображения, анализ которых дает возможность восстановить параметры микрорельефа. Дополнительно для зондирования капли на прозрачной подложке используются плоские лазерные пучки [Pavlov 2015], позволяющие восстанавливать значения функции уровня поверхности в дискретном наборе сечений капли с последующей реконструкцией и компьютерной визуализацией ее глобального и микрорельефа.

## 2. Экспериментальная установка и рефракционный метод

В эксперименте визуализировались микронеоднородности рельефа поверхности капли дистиллированной воды, образующиеся в процессе ее испарения с шероховатой подложки. С этой целью использовалась экспериментальная установка, схема которой изображена на рис. 1.

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, показанные на рис. 2 а, в. Изображения б и г получены через несколько минут после нанесения капли на поверхность.

В центре каждого изображения наблюдается тень от капли на фоне светлого пятна с радиусом зондирующего пучка. Наличие рефракционного изображения с характерным размером, в данном случае много большего размера капли, обусловлено тем, что капля представляет собой жидкостную линзу с фокусным расстоянием, изменяющимся при испарении капли в пределах от 0,5 до 5-7 см. Анализ рефракционного изображения на основе моделирования и решения обратной задачи рефракции позво-

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект № 14-08-00948-а) и частичной финансовой поддержке стипендии Президента Российской Федерации молодым ученым и аспирантам, осуществляющим перспективные научные исследования и разработки по приоритетным направлениям модернизации российской экономики на 2015-2017 годы. Работа опубликована по гранту РФФИ №16-07-20482.

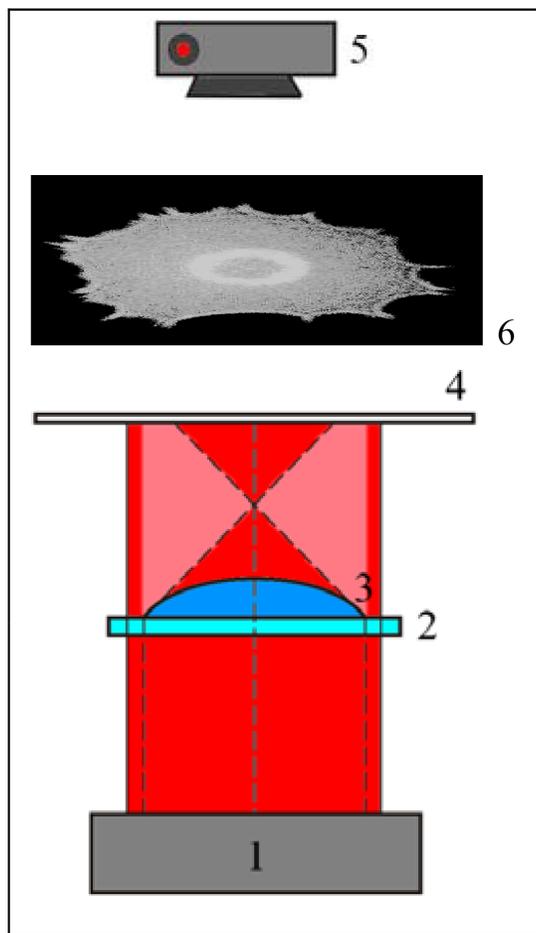


Рис. 1: Схема зондирования: 1 – зондирующий пучок, 2 – прозрачная подложка, 3 – капля, 4 – экран, 5 – видеокамера, 6 – рефракционное изображение.

лил установить, что дугообразные участки контура формируются из-за наличия в области линии контакта микронеоднородностей рельефа поверхности капли с характерным размером 10-100 мкм. Капля как линза, отображая контуры этих неоднородностей, многократно увеличивает их. Характерные размеры рефракционного изображения определяются локальными значениями краевого угла для данной поверхности. Контур рефракционного изображения формируется в зависимости от шероховатости и степени загрязненности поверхности, ее адгезионных свойств, химического состава жидкости, наличия в ней растворенных солей и взвесей. На рис. 3 показаны рефракционные изображения, соответствующие последовательным моментам времени в процессе испарения капли. В течение всего времени наблюдения изображения остаются самоподобными вплоть до момента скачкообразной деформации линии трехфазного контакта капли, изменяется только масштаб изображения, что вызвано уменьшением краевого угла при неизменном

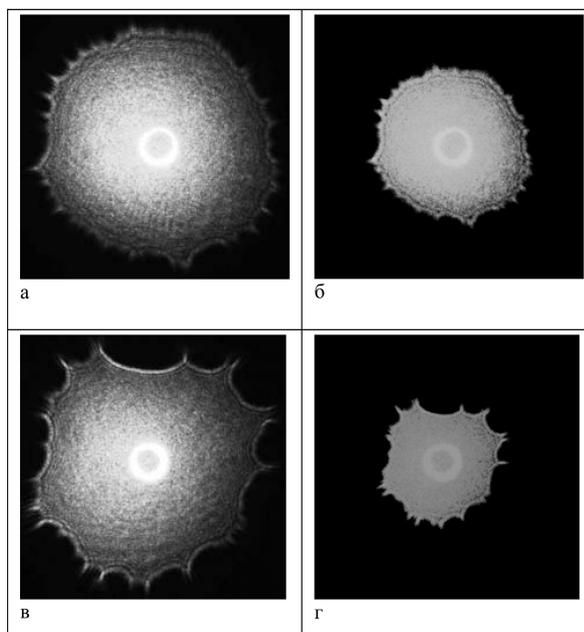


Рис. 2: Характерные экспериментальные изображения: а, б – шероховатость поверхности порядка 2 нм; в, г – шероховатость поверхности порядка 10 нм.

положении линии контакта. На рис.3 б,г крупным планом показаны изображения, позволяющие наблюдать деформацию линии контакта. В момент деформации на этом участке происходит увеличение краевого угла, а при установлении равновесия линии контакта формируется новая структура микрорельефа. На недеформируемом участке сохраняются основные элементы структуры микрорельефа, т.е она демонстрирует определенную устойчивость даже после частичной деформации линии контакта.

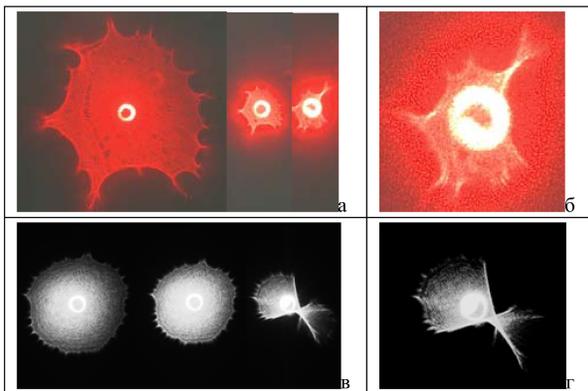


Рис. 3: Динамика рефракционных изображений при испарении капли: а, б – съемка фотоаппаратом Nikon J1, в, г – съемка видеокамерой Videoscan.

### 3. Моделирование рельефа поверхности

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 (рис. 4а). 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 [8], особенности изображения будут проявляться там, где луч – асимптотический 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 каустики, образующихся при наличии линий перегиба на поверхности капли вблизи линии контакта. Вторым вариантом рельефа, который в принципе может давать такие же изображения – рельеф «арочного» типа. В этом случае на капле образуются вогнутые участки в форме «арок», (рис. 4б). В области сопряжения вогнутого участка большой кривизны с выпуклой поверхностью капли образуется складка, которая в соответствии с [8] отображается в каустику, причем форма каустики примерно повторяет изгиб «арки». По рефракционным изображениям нельзя однозначно сказать, какой именно рельеф мы наблюдаем, поэтому требуется независимая проверка. Как было установлено при непосредственном наблюдении поверхности капли в микроскоп, в случае ее испарения с шероховатой поверхности наблюдается только «арочная» структура микрорельефа.

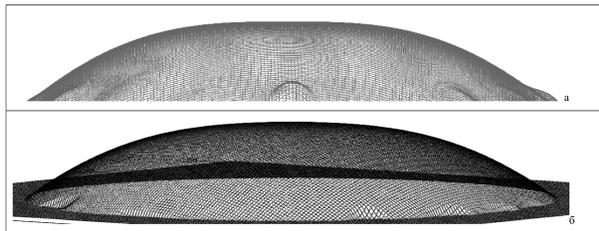


Рис. 4: Два возможных типа микрорельефа поверхности капли: а) выпуклые участки микрорельефа; б) вогнутые участки микрорельефа.

На рис. 5 представлено рефракционное изображение, смоделированное для случая выпуклых участ-

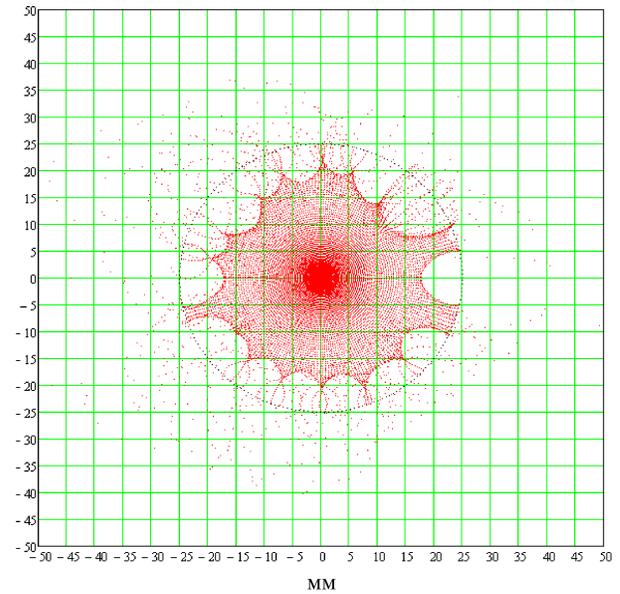


Рис. 5: Рефракционное изображение капли при наличии микрорельефа (моделирование).

ков микрорельефа. Аналогичное изображение будет наблюдаться, если вместо выпуклых участков будут вогнутые с теми же характерными размерами.

Характерные радиальные и азимутальные размеры  $\Delta r_{1,2}$  элемента микроструктуры на радиально симметричной капле можно определить из соотношения

$$\Delta r_{1,2} = r_0 \frac{\Delta R_{1,2}}{R(\theta)}$$

где  $\Delta R_{1,2}$  соответственно характерные радиальные и азимутальные параметры положения каустики на изображении,  $R(\theta)$  – радиус окружности, огибающей рефракционное изображение (рис.5),  $\theta$  – краевой угол,  $r_0$  – радиус капли. Анализ рефракционных изображений и их моделирование позволили сделать вывод о том, что радиус  $R(\theta)$  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 [Pavlov 2015]. Смоделированный рельеф поверхности капли, соответствующий данному изображению представлен на рис. 6. На рис. 7 для сравнения представлено характерное для исследуемой поверхности экспериментальное изображение профиля капли.

### 4. Заключение

В работе был использован рефракционный метод визуализации микроструктур на поверхности

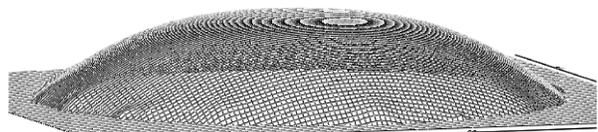


Рис. 6: Форма капли, соответствующая рисунку 5.

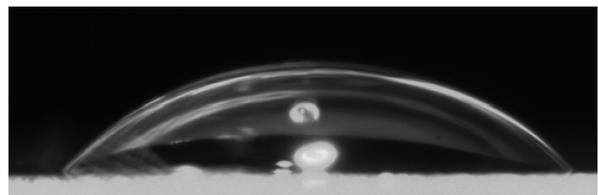


Рис. 7: Экспериментальное изображение профиля капли.

капли жидкости, позволяющий на основе анализа изображений восстанавливать характерные параметры микрорельефа в области линии трехфазного контакта, измерять значения краевого угла и наблюдать динамику деформаций контура контактной поверхности. Результаты математического моделирования позволили установить, что наблюдаемые в эксперименте з«вздообразные» изображения могут возникать при наличии в области контактной линии микроструктур двух типов: вогнутых участков с характерным размером 10-100 мкм или же, напротив, выпуклых участков таких же размеров. Формирование характерного яркого контура на изображении объясняется тем, что в области сопряжения участков разной кривизны на поверхности капли образуются либо складки (в случае вогнутых участков), либо линии перегиба (в случае выпуклых участков), которые при градиентном отображении поверхности имеют вид каустик. На основе экспериментальных изображений восстановлены параметры глобального рельефа и микрорельефа капли и осуществлена компьютерная визуализация профиля ее поверхности.

## Литература

- [1] Bateni A., Susnar S.S., Amirfazli A. et al. // *Colloids Surf. A*. 2003. V. 219. P. 215.
- [2] Del Rio O.I., Kwok D.Y., Wu R. et al. // *Colloids Surf. A*. 1998. V. 143. P. 197.
- [3] 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. June 15, 2015 – June 18, 2015.
- [4] Stalder A.F., Kulik G., Sage D. et al. // *Colloids Surf. A*. 2006. V. 286. P. 92.
- [5] Арнольд В.И. Математические методы классической механики. М.: Наука, 1989.
- [6] Дерягин Б.В. О Зависимости краевого угла от микрорельефа или от шероховатости смачиваемой поверхности // *ДАН СССР*. 1946, т. 51, № 7. С. 357-360.
- [7] Матюхин С.И., Фроленков К.Ю. Форма капель жидкости, помещенных на твердую горизонтальную поверхность К/онденсированные среды и межфазные границы. 2013. Том 15. № 3. С. 292-304.
- [8] Сумм Б.Д., Горюнов Ю.В. Физико-химические основы смачивания и растекания. М.: Химия, 1976. 231 с.