

DOI: 10.17586/1023-5086-2024-91-04-123-134

УДК 543.45; 535.41; 532.64, 536.24

## Оптические методы для измерения толщин тонких испаряющихся плёнок жидкости

Елизавета Яковлевна Гатапова<sup>1✉</sup>, Юлия Александровна Пещенюк<sup>2</sup>

Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе Сибирского отделения Российской академии наук, Новосибирск, Россия

<sup>1</sup>gatapova@itp.nsc.ru

<https://orcid.org/0000-0002-8152-6690>

<sup>2</sup>peschenyuk.yulya@gmail.com

<https://orcid.org/0000-0002-2237-3583>

### Аннотация

**Предмет исследования.** Исследование особенностей испарения, поверхностных деформаций, разрывов, толщин капель и тонких плёнок жидкости, испаряющихся на нагреваемых поверхностях оптическими методами. Задача актуальна для проектирования систем охлаждения микроэлектронного оборудования, основанных на интенсивном испарении тонких плёнок жидкости. **Цель работы.** Измерение толщин тонких плёнок жидкости менее 20 мкм до десятков нанометров бесконтактными методами, а также анализ изменения скорости испарения с поверхности капли и тонкой плёнки жидкости. **Метод.** Приведены результаты измерений толщин тонких плёнок жидкости двумя оптическими методами: интерференционным с анализом изображений и шпирен-методом с градиентным фильтром. **Основные результаты.** Получены количественные данные по интенсивности испарения тонких капель жидкости на нагреваемых поверхностях для летучих и нелетучих жидкостей. Методом интерферометрии с анализом изображений измерены толщины плёнок жидкости вплоть до 40 нм и измерены величины динамических краевых углов смачивания испаряющейся тонкой капли жидкости. Применён шпирен-метод со ступенчатым фильтром для измерения толщин плёнок жидкости на чёрном кремнии. Использование подложки, поглощающей свет видимого диапазона, позволило измерить толщины плёнок жидкости до 2 мкм. По значениям углов наклона поверхности восстановлены толщина, площадь поверхности и объём капли для анализа интенсивности испарения. **Практическая значимость.** Представленные в работе два оптических метода измерения толщины тонких плёнок жидкости позволяют эффективно определять в динамике толщину и характеризовать множественные разрывы, происходящие при интенсивном испарении и нагреве. Данные методы могут применяться для измерения отступающего краевого угла смачивания.

**Ключевые слова:** интерференционный метод, шпирен-метод, градиентный фильтр, чёрный кремний, тонкая плёнка жидкости, испарение

**Благодарность:** исследование выполнено за счёт гранта Российского научного фонда № 20-19-00722, <https://rscf.ru/project/20-19-00722/>. Характеризация свойств смачивания поверхности чёрного кремния выполнено за счёт государственного контракта с ИТ СО РАН (121031800213-0) на приборе KRUSS DSA-100E уникальной научной установки «ТГД комплекс ИТ СО РАН» Института теплофизики СО РАН.

**Ссылка для цитирования:** Гатапова Е.Я., Пещенюк Ю.А. Оптические методы для измерения толщин тонких испаряющихся плёнок жидкости // Оптический журнал. 2024. Т. 91. № 4. С. 123–134. <http://doi.org/10.17586/1023-5086-2024-91-04-123-134>

Коды OCIS: 110.3175, 120.3180, 100.2960, 100.3175, 100.6890, 120.5700, 110.0180, 110.2650, 110.1650, 180.3170.

# Optical methods for measuring the thickness of thin evaporating liquid films

ELIZAVETA YA. GATAPOVA<sup>1</sup>✉, YULIA A. PESCHENYUK<sup>2</sup>

*Kutateladze Institute of Thermophysics of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Novosibirsk, Russia*

<sup>1</sup>gatapova@itp.nsc.ru

<https://orcid.org/0000-0002-8152-6690>

<sup>2</sup>peschenyuk.yulya@gmail.com

<https://orcid.org/0000-0002-2237-3583>

## Abstract

**The subject of study** is evaporation characteristics, surface deformations, ruptures, thicknesses of droplets and thin films of liquid evaporating on heated surfaces by optical methods. The problem is relevant to the design of cooling systems for microelectronic devices based on the intense evaporation of thin liquid films. **The aim of the work** is measurement of thickness of thin liquid films from less than 20 microns to tens of nanometers using non-contact methods, and analysis of changes in the rate of evaporation from the surface of a drop and a thin film of liquid. **Method.** The results of thin liquid film thickness measurements applying two optical techniques are presented: the image analyzing interference method and the Schlieren method with a gradient filter. **Main results.** The quantitative data on the intensity of thin droplet evaporation on heated surfaces were obtained for volatile and non-volatile liquids. Interferometry with image analysis was used to measure the liquid film thicknesses down to 40 nm and to measure the dynamic contact angle of evaporating thin liquid droplet. The Schlieren method with a stepped filter was applied to measure the liquid film thickness on black silicon. The use of a substrate that absorbs light in the visible range allowed us to measure the thickness of liquid films down to 2 microns. From the surface tilt angles the thickness, surface area and volume of the droplet were reconstructed to analyze the evaporation intensity. **Practical significance.** The two optical methods for measuring the thin liquid films thickness presented in this work allow us to determine the thickness in dynamics and characterize multiple dry spots occurring during the intense evaporation and heating. These methods can be applied for measuring the receding contact angle.

**Keywords:** interference method, Schlieren method, gradient filter, black silicon, thin liquid film, evaporation

**Acknowledgment:** this research was supported by the Russian Science Foundation, project № 20-19-00722, <https://rscf.ru/en/project/20-19-00722/>. Characterization of the wetting properties of the black silicon surface was carried out through a state contract with IT SB RAS (121031800213-0) on the KRUSS DSA-100E device of the Unique scientific installation "TGD complex IT SB RAS" of the Institute of Thermophysics SB RAS.

**For citation:** Gatapova E.Ya., Peschenyuk Y.A. Optical methods for measuring the thickness of thin evaporating liquid films [In Russian] // *Opticheskii Zhurnal*. 2024. V. 91. № 4. P. 123–134. <http://doi.org/10.17586/1023-5086-2024-91-04-123-134>

**OCIS codes:** 110.3175, 120.3180, 100.2960, 100.3175, 100.6890, 120.5700, 110.0180, 110.2650, 110.1650, 180.3170.

## ВВЕДЕНИЕ

Испаряющиеся тонкие плёнки жидкости встречаются во многих задачах гидродинамики, теплообмена, физхимии, а также во многих практических приложениях. Изучение плёнки жидкости осложняется наличием развитой линии контакта трёх фаз, где границы раздела жидкость–газ контактируют с твёрдой поверхностью. Понимание явлений переноса на микромасштабе вблизи устойчивых и движущихся

линий контакта трёх фаз и их зависимость от морфологии твёрдой поверхности важно для разработки эффективных и надёжных систем терморегулирования для компактных и долговечных электронных устройств, таких как тепловые трубы и паровые камеры. Поверхность тонкой плёнки жидкости может быть неустойчива, что приводит к деформациям поверхности или разрывам. Поэтому для исследования тонких плёнок применяют

бесконтактные оптические методы, которые не вносят дополнительных возмущений в исследуемый объект.

Несмотря на то, что оптические методы были первоначально разработаны уже пару столетий назад, в последнее время передовые оптические методы стали использоваться в многофазных течениях и в исследованиях теплообмена с фазовыми переходами при кипении, испарении и конденсации. Применение оптических методов в задачах теплообмена обусловлено рядом преимуществ таких как бесконтактность, автономность работы системы, получение данных в реальном времени и высокое пространственное разрешение.

Оптические методы для исследования свойств поверхностей разделяют на три категории [1]: 1) методы, основанные на стереокорреляции [2–4]; 2) методы, основанные на проецировании рисунка на поверхность [5, 6]; 3) методы, которые основаны на изменении световых параметров на границе раздела воздух(газ)/жидкость: преломление, поглощение и отражение [7–10]. Бесконтактные методы измерения толщины плёнки жидкости обычно основаны на измерениях поглощения света или интенсивности излучения, а также на оптических и флуоресцентных свойствах жидкости и газа [11–23]. Теневой метод и шпирен-визуализация успешно используются для измерения деформаций поверхности и толщины плёнки жидкости, обычно не менее 10–100 мкм, в зависимости от оптического разрешения системы. Последние достижения в измерениях тонких жидких плёнок толщиной менее 10 мкм связаны с оптическими методами, такими как конфокальная микроскопия и интерферометрические методы. Для измерения толщины тонкой плёнки жидкости и получения профиля плёнки жидкости вблизи линии контакта трёх фаз обычно применяют эллипсометрию [13, 14] и интерферометрию [15, 20, 21, 23–26], а также рефлектометрию [16]. В последнее время особенно актуальным является разработка оптических методов для измерения толщин тонких и ультратонких плёнок жидкости для быстропротекающих процессов, когда теплообмен существен. Более того, такие методы должны давать количественные характеристики по интенсивности массоотдачи в режиме реального времени.

Целью данной работы является измерение толщин тонких плёнок жидкости от 20 мкм до десятков нанометров бесконтактными методами, а также анализ изменения скорости испарения с поверхности тонкой капли жидкости. В данной работе представлено два оптических метода, которые могут быть использованы в микро-/наноразмерном теплообмене, например, при капельной конденсации и испарении, где нужны характеристики профилей микрокапель. А именно, интерференционный метод с анализом изображений и улучшенный шпирен-метод, с использованием которых были измерены толщины тонких плёнок жидкости. Приводятся также результаты исследований испаряющихся капель жидкости на нагреваемых поверхностях данными методами.

## ОПТИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ И РЕЗУЛЬТАТЫ ИЗМЕРЕНИЙ

### Интерференционный метод с анализом изображений

Эксперименты с применением интерференционного метода были проведены на гладких микроскопных стёклах 27×46 мм<sup>2</sup> (Struers), которые обеспечивали достаточную прозрачность в видимом диапазоне света. На рис. 1 приведён характерный рельеф поверхности стекла, измеренный с помощью сканирующего нанотвердомера НаноСкан-3D. Эксперименты проводились на установке, подробно описанной в статье [20]. Основным методом для восстановления профилей микро- и наноплёнки жидкости был метод интерферометрии с анализом изображений (рис. 2а, 2б). Этот метод позволяет измерять толщину плёнки

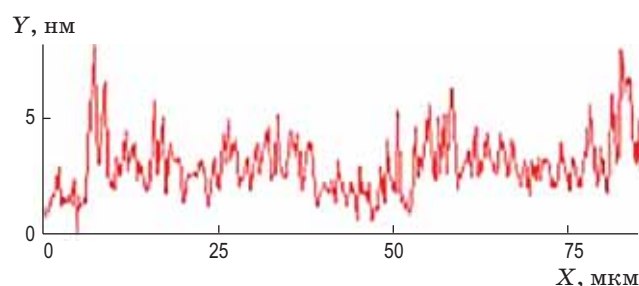
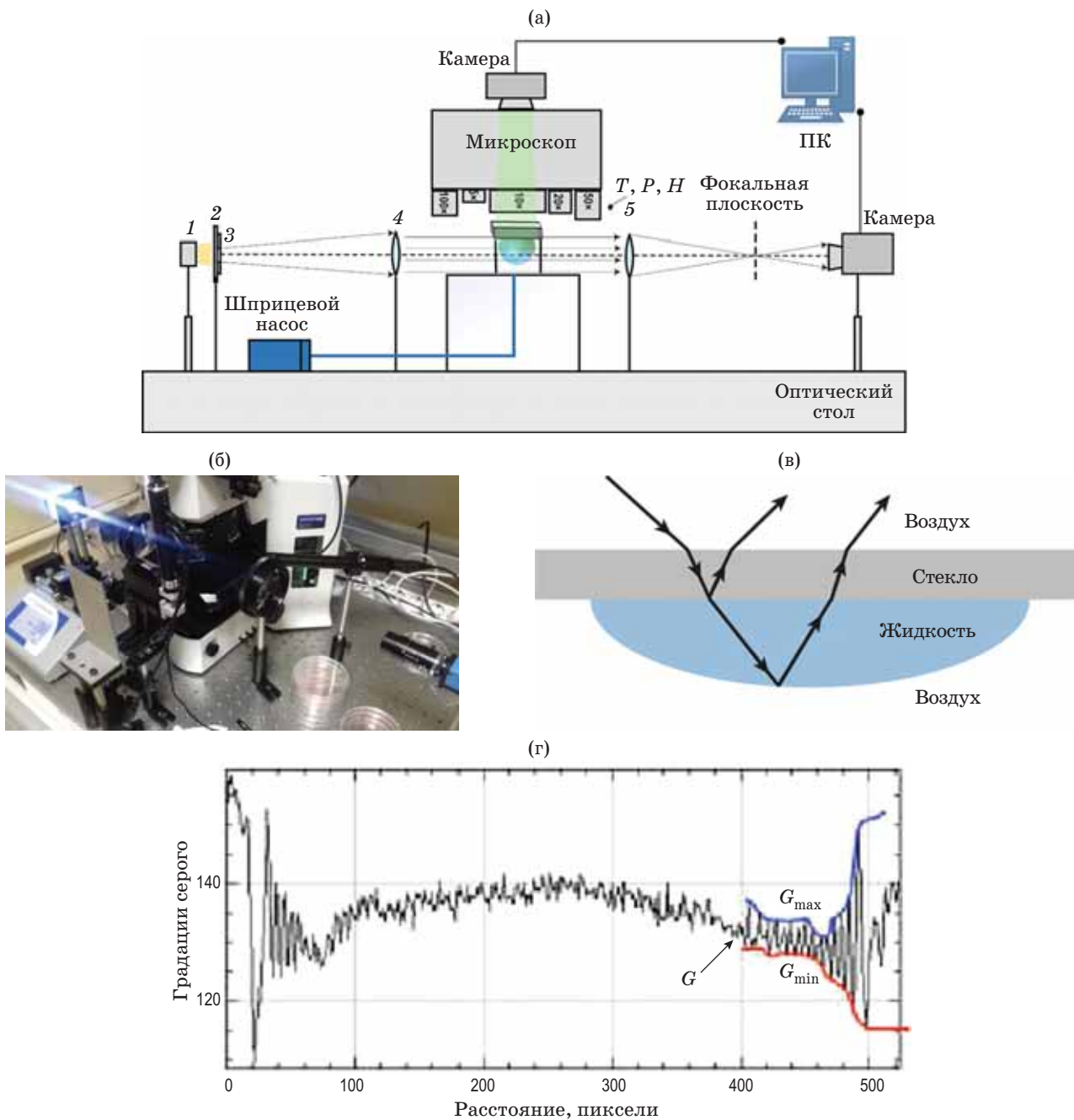


Рис. 1. Характерный рельеф поверхности стекла  
Fig. 1. Glass surface profile



**Рис. 2.** Схема оптической системы с микроскопом для интерференционного метода и системы для теневого метода (а); фотография установки (б); ход лучей (в); мажоранта и миноранта функции для величины уровня серого  $G(y)$  (г)

**Fig. 2.** Diagram of an optical system with a microscope for the interference method and a system for the shadow method (a); setup photo (б); beam path (в); majorant and minorant of the function for the gray level  $G(y)$  (г)

от нескольких нанометров до нескольких микрон на относительно большой площади с участками разной кривизны в зависимости от разрешения оптической системы. Метод осуществляется с использованием микроскопа Olympus VX51 с различными объекти-

вами и монохромной CMOS-камеры. Система обеспечивает разрешение, при котором масштаб длины (количество пикселей на единицу длины) составляет от 1 мкм/пиксел (при использовании 10x объектива) до 100 нм/пиксел (при использовании 100x объектива), при этом

разрешающая способность будет хуже (около 210 нм/пиксел). Видеозапись производилась с различной частотой от 10 до 200 кадров в секунду. Для освещения образца через объектив микроскопа использовался когерентный свет с длиной волны  $\lambda = 543,5$  нм (зелёный). Заданная длина волны создавалась с использованием фильтра. Отражение монохроматического света на границах раздела «жидкость–газ» и «жидкость – твёрдое тело» приводит к возникновению интерференционных полос (рис. 2в, 2г). Отражательная способность плёнки жидкости, выраженная в виде интерференционных полос, зависит от толщины плёнки. Наш подход отличается от классического метода интерферометрии, в котором для построения профилей используются только пики. Мы используем саму полную волновую функцию зависимости интенсивности от координат в интерференционной картине, которая позволяет получать и аппроксимировать данные на каждом пикселе. Поэтому сначала необходимо оцифровать полученное интерференционное изображение и присвоить значение серого. Во-вторых, нужно правильно найти функции мажоранты и миноранты. И необходимо найти значение относительного серого, используя простую формулу для расчёта.

$$\bar{G}(y) = \frac{G(y) - G_{\min}(y)}{G_{\max}(y) - G_{\min}(y)}, \quad (1)$$

где  $G_{\min}$  — миноранта и  $G_{\max}$  — мажоранта исходной функции  $G$  уровня серого, соответственно. Затем, используя показатели преломления каждой среды, можно получить толщину плёнки в каждой точке:

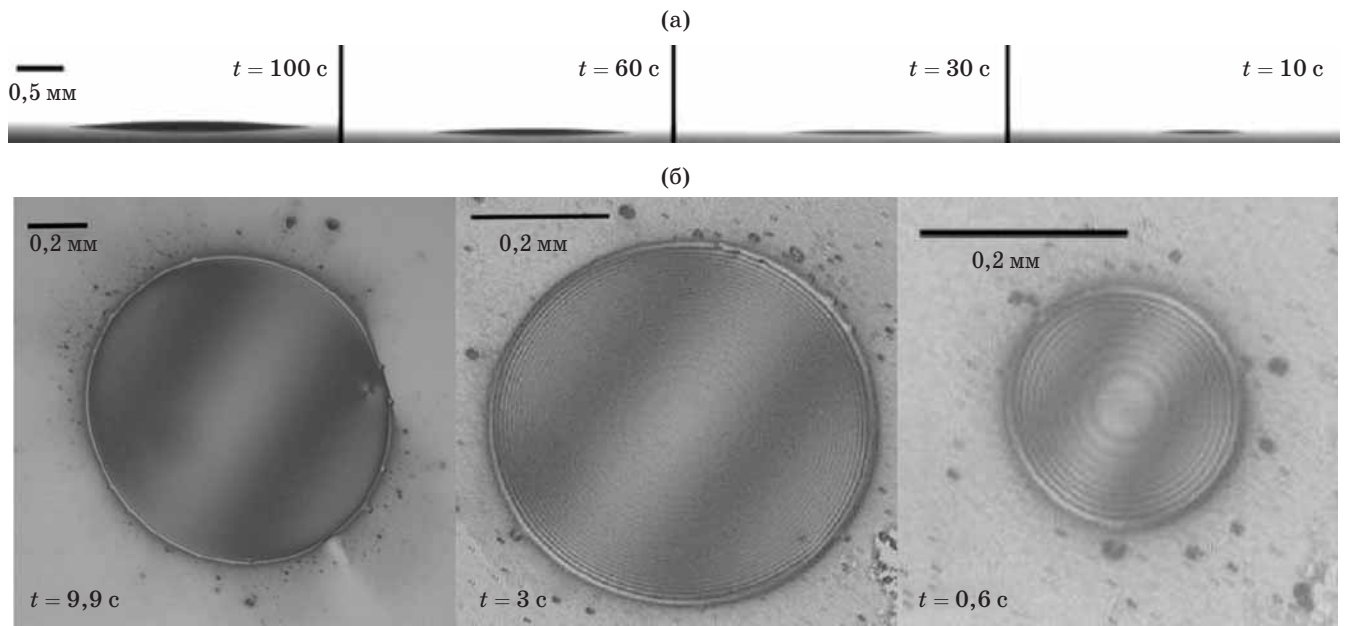
$$h = \left[ \frac{1}{2 \cos\left(\frac{\beta + \alpha(1 - 2\bar{G})}{\beta(2\bar{G} - 1) - \alpha}\right)} - \frac{\alpha}{2} \right] \times \frac{\lambda}{2\pi n_l}, \quad (2)$$

где  $\alpha = 1 + \left(\frac{n_l - n_g}{n_l + n_g}\right)^2 \left(\frac{n_s - n_l}{n_s + n_l}\right)^2$ ,  $\beta = 2 \frac{n_l - n_g}{n_l + n_g} \frac{n_s - n_l}{n_s + n_l}$ ,  $\lambda$  — длина волны света,

$n_l, n_g, n_s$  — показатели преломления жидкости, газа и твёрдого тела, соответственно. В дан-

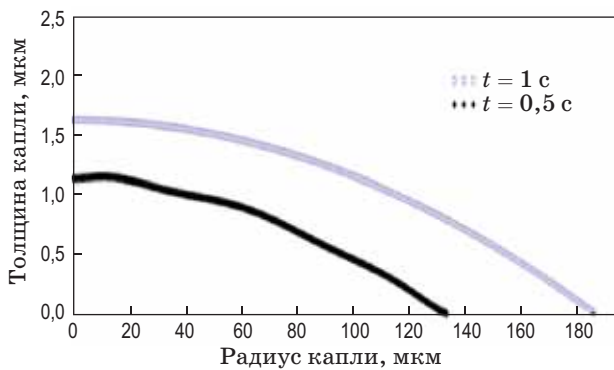
ном случае для расчёта толщины плёнки использовались показатели преломления воды  $n_l = 1,3333$ , воздуха  $n_g = 1,00278$ , стекла  $n_s = 1,5189$ .

Интерференционные изображения использовались для построения профиля высоты вблизи контактной линии и определения краевого угла смачивания, а также для построения профилей капель для малых краевых углов смачивания и последующего расчёта объёмов капель, включая капли пиколитрового размера. Дополняющим методом для исследований испарения капли жидкости был метод теневой визуализации с разрешением 3 мкм/пиксел (рис. 2а). В состав оптической системы входят светодиодный источник света Olympus KL 300 1, матовое стекло 2, фильтр с точечным отверстием 3, две линзы 4, 5 и монохромная CMOS-камера с объективом. В фокальной плоскости данной системы для улучшения качества изображения также может быть расположен непрозрачный щит с точечным отверстием. На рис. 3 приведены характерные картинка для испарения капли воды на стеклянной подложке в отсутствие нагрева, полученные с помощью теневого метода (рис. 3а) и интерференционной оптической системы (рис. 3б). Ведётся обратный отсчёт времени, т.е.  $t = 0$  с соответствует полному испарению капли с начальным объёмом 2 мкл. Для относительно больших капель теневой метод достаточно точно определяет такие параметры как контактный радиус, высота капли, объём и краевой угол смачивания. При этом для краевых углов менее  $10^\circ$  разрешение и точность теневого метода становится уже недостаточной для определения перечисленных параметров. Объём капли, посчитанный на основе полученного интерференционным методом профиля капли, составил 9,8 нл ( $9,8 \times 10^{-3}$  мкл) в момент времени  $t = 9,9$  с и 56 пкл ( $56 \times 10^{-6}$  мкл) при  $t = 0,6$  с (данные для испарения капли, изображённой на рис. 3). Вычислив изменение объёма и площади поверхности капли во времени, можно посчитать скорость испарения капли жидкости, т.е. изменение удельного расхода испарившейся жидкости во времени. На рис. 4 изображены восстановленные профили капли воды на последней стадии испарения. Как только определены профили, можно определить кривизну поверхности и краевой угол смачивания [20],



**Рис. 3.** Процесс испарения капли жидкости. а) Изображения, полученные теневым методом, процесса испарения капли воды. Масштаб 0,5 мм; б) интерференционные картины процесса испарения капли. Масштаб 0,2 мм

**Fig. 3.** The process of evaporation of liquid droplet. (a) Shadowgraph images of a water droplet evaporation process. Scale 0.5 mm; (b) interference images of the droplet evaporation process. Scale 0.2 mm



**Рис. 4.** Профили капли воды, восстановленные с помощью интерференционного метода

**Fig. 4.** Water drop profiles reconstructed using the interference method

находя производную функции для профиля капли в точке вблизи точки линии контакта трёх фаз. Контактный радиус, высота капли и краевой угол смачивания за 1 с до полного исчезновения составили 185 мкм, 1,625 мкм и  $1,2^\circ$ , соответственно, а при  $t = 0,5$  с соответственно 133 мкм, 1,125 мкм и  $1,05^\circ$  (рис. 4). Высота капли была равна 260 нм за  $t = 0,05$  с до полного исчезновения. Контактный радиус

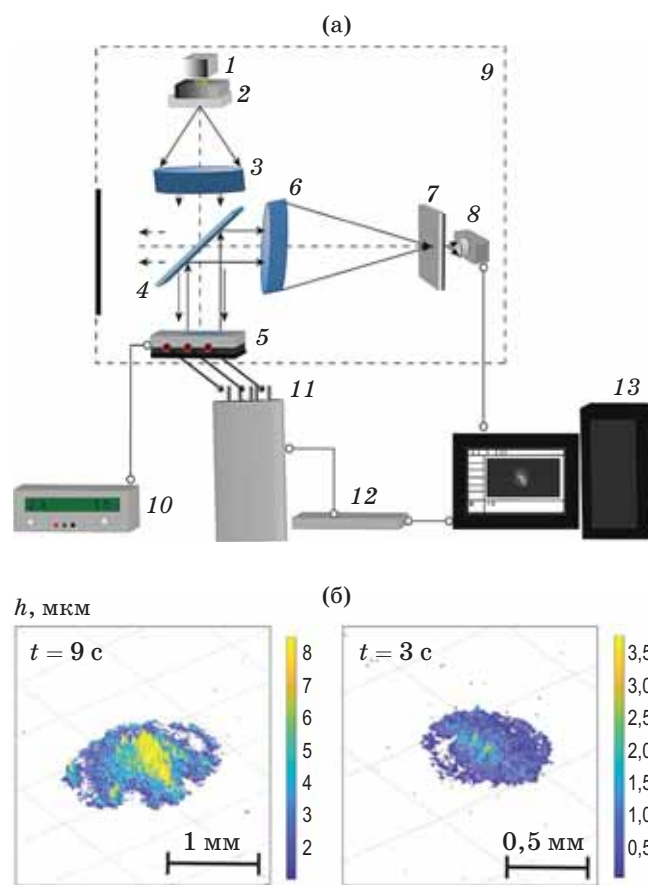
последней наблюдаемой капли на стекле составил 23–27 мкм. Интерференционным методом с анализом изображений измерены толщины до 40 нм с достаточной точностью. Например, для профилей капли жидкости, изображенной на рис. 4, при изменении функции для толщины плёнки от 40 нм до 0 нм контактный радиус капли меняется на 5–8 мкм. На такое расстояние приходится минимум 2 пика (рис. 2г). С учётом того, что разрешение — 1 мкм/пиксел, и мы используем функцию, определённую на каждом пикселе, то легко заметить, что 40 нм мы измеряем с хорошей точностью. Это также видно на рис. 4.

#### Шлирен-метод со ступенчатым фильтром

Для увеличения пространственного разрешения и получения более чёткого изображения [22, 27] был применён шлирен-метод со ступенчатым фильтром. Использовались семь ступеней серого. С целью измерения абсолютной величины толщины тонкой плёнки жидкости в качестве подложки использовался чёрный кремний (b-Si), поглощающий свет в видимом диапазоне. Измеренная отражательная способность использованного чёрного кремния

в диапазоне длин волн 350–1000 нм, что охватывает спектр видимого света, составила менее 7% [27]. Более того, для данного эксперимента эта величина составляет менее 3%, поскольку использовался источник света, излучающий в диапазоне от 400 до 780 нм. То есть свет, попадающий на образец с каплей, отражается с поверхности капли жидкости и поглощается подложкой b-Si. Для измерения абсолютной величины толщины плёнки жидкости с достаточной точностью степень поглощения подложки является важным параметром. Поскольку для получения толщины плёнки жидкости сначала изображение сухой (без капли) подложки преобразуется в матрицу значений уровней серого, которая вычитается из матрицы значений серого каждого обрабатываемого изображения. Т.е. чем «чернее» подложка (т.е. чем лучше поглощение света), тем меньше помех и тем точнее можно измерить абсолютную величину толщины плёнки жидкости шлирен-методом, который основан на принципе отражения света.

Схема экспериментальной установки с оптической системой представлена на рис. 5а. Элементами оптической системы являются источник света 1, ступенчатый фильтр и матовое стекло 2, коллимирующая линза 3, светоделитель 4, шлирен-линза 6, шлирен-фильтр 7, камера с объективом 8. Кроме этого установка включает в себя рабочий участок 5, состоящий из подложки, нагревателя с вмонтированными термопарами, защитный бокс 9, источник питания 10, точка 0 °С в виде тающего водяного льда 11, АЦП 12, ПК 13. Шлирен-метод был улучшен посредством использования ступенчатого фильтра и специальной калибровки, что позволило измерить относительно большие углы наклона. Система калибруется с использованием гладкого зеркала ME2-G01 (Thorlabs) в качестве подложки, посредством смещения источника света вместе со ступенчатым фильтром относительно оптической оси и при изменении угла наклона зеркала. При смещении источника света с фильтром меняется интенсивность света, так как каждая градация на ступенчатом фильтре имеет разный уровень (плотность) серого цвета. Каждая градация серого соответствует определённому углу наклона. Более подробно обо всех процедурах калибровки написано в статье [27]. Таким образом, использованная



**Рис. 5.** (а) Экспериментальная установка с оптической шлирен-системой. 1 — источник света, 2 — ступенчатый фильтр и матовая пластинка, 3 — коллимирующая линза, 4 — светоделитель, 5 — система, состоящая из подложки и нагревателя, 6 — шлирен-линза, 7 — шлирен-фильтр, 8 — камера, 9 — защитный бокс, 10 — источник питания, 11 — точка 0 °С (тающий водяной лёд), 12 — АЦП, 13 — ПК; (б) измеренные шлирен-методом 3D-карта толщин для капли воды для температуры подложки 40 °С (масштаб в мкм). Время  $t = 0$  с соответствует моменту полного исчезновения капли.  $h$  — толщина капли (масштаб в мкм)

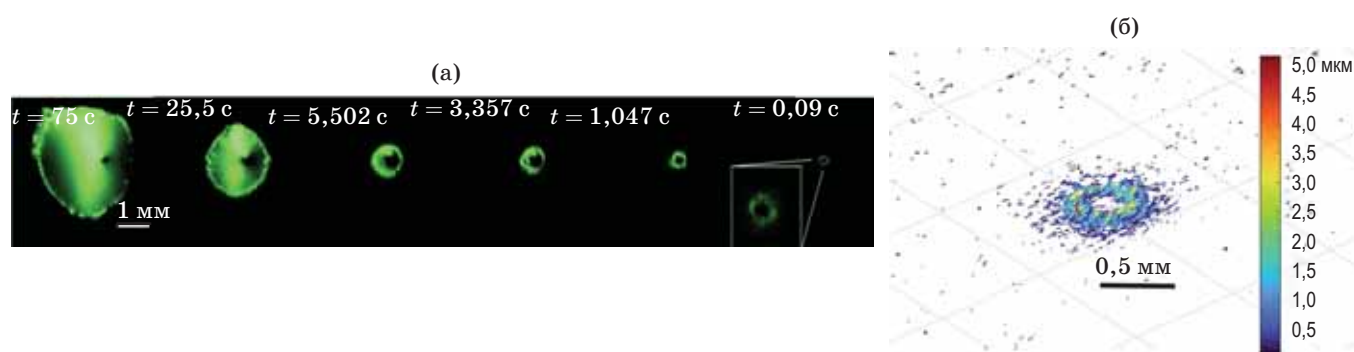
**Fig. 5.** (a) The experimental setup with an optical schlieren system. 1 — light source, 2 — step filter and matte plate, 3 — collimating lens, 4 — beam splitter, 5 — system consisting of a substrate and heater, 6 — schlieren lens, 7 — schlieren filter, 8 — camera, 9 — protective box, 10 — power supply, 11 — 0 °C point (melting water ice), 12 — DAQ (data acquisition system), 13 — PC (personal computer); (б) 3D thickness map for a water drop for a substrate temperature of 40 °C (scale in  $\mu\text{m}$ ) measured by Schlieren-method. The time  $t = 0$  s corresponds to the moment of complete disappearance of the drop.  $h$  is the thickness of drop (scale in  $\mu\text{m}$ )

оптическая система позволяет определять углы наклона до  $10^\circ$ . В качестве примера мы исследовали завершающую стадию испарения капли жидкости на нагреваемой подложке. Эксперименты были проведены для воды, а также для летучих, идеально смачивающих жидкостей FC-72 и HFE-7100 [27]. Толщина тонкой плёнки жидкости до 2 мкм измерялась с использованием подложки b-Si, которая имеет низкий коэффициент отражения и высокое поглощение видимого света. Подложку нагревали в диапазоне температур от 20 до  $50^\circ\text{C}$ . Для анализа и обработки полученных данных была написана программа в среде Matlab. Также определялись референсные значения для самой подложки b-Si. Расчётный алгоритм автоматически преобразует изображение в матрицы значений уровня серого с помощью процедуры .mat в Matlab попиксельно, где каждая ячейка матрицы содержит значение уровня серого от 0 до 256. Оттенки серого были сопоставлены со значениями углов наклона поверхности жидкости. Значения измеряемых углов находятся в пределах от  $-5^\circ$  до  $5^\circ$ . Для расчёта толщины тонкой плёнки жидкости «фоновая» матрица (матрица значений серого подложки) вычиталась из матрицы значений серого обрабатываемого изображения. Полученные значения серого преобразовываются в значения углов. Таким образом, толщину плёнки жидкости можно определить для каждого пиксела. Для восстановления высоты использовался метод численного интегрирования. В результате получаем толщину тонкой капли жидкости и деформации в разное время для всей капли. Таким образом получаем 3D-данные для всей капли, т.е. определяем толщину плёнки жидкости, поверхностные деформации, кажущийся краевой угол смачивания по всем направлениям пространственных координат в каждый момент времени. Так можно описать общую эволюцию находящихся на подложке капель во время испарения. Суммарная погрешность определения толщины плёнки составляет  $\pm 0,3$  мкм.

Для анализа процесса испарения и определения скорости испарения на основе данных по толщине плёнки для всей капли в каждый момент времени вычисляется площадь поверхности и объём жидкости методом элементарных параллелепипедов. Поскольку шликрен-метод не использует данные о свойстве среды,

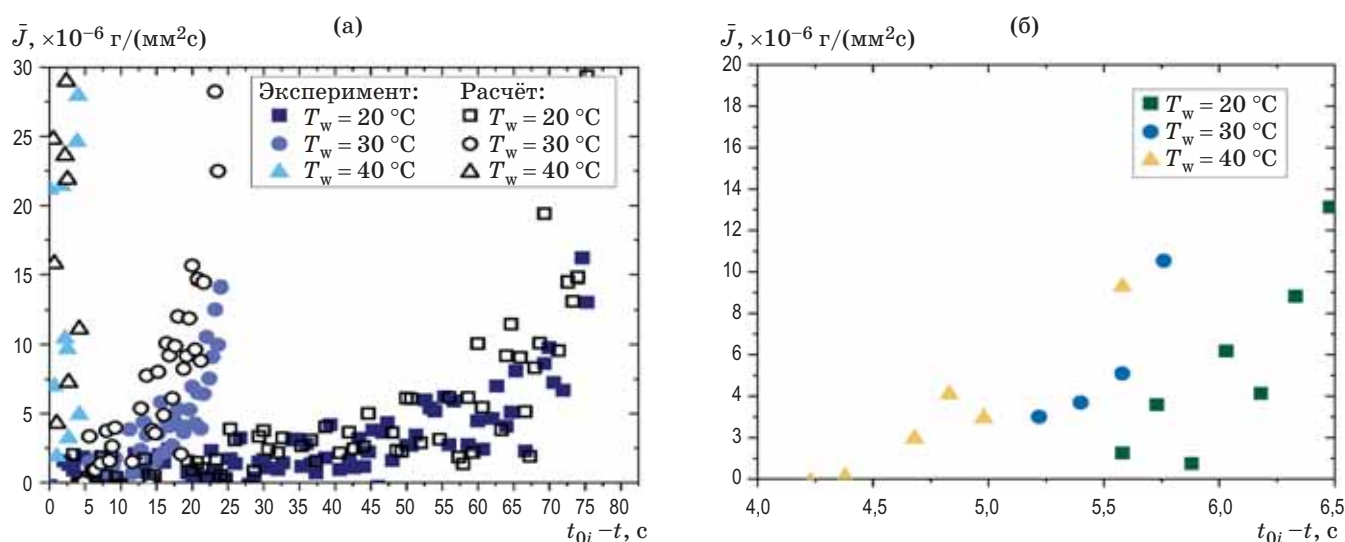
такие как, например, показатели преломления, которые могут меняться во времени для быстропротекающих процессов, дорогостоящую оптическую систему, а также с использованием созданного алгоритма и софта, метод может измерять деформации и толщины тонких плёнок в реальном времени для быстропротекающих процессов при использовании высокоскоростной камеры. На примере данной задачи об испарении нагреваемой капли жидкости мы убедились, что шликрен-метод является отличным инструментом для измерения толщины тонких плёнок жидкости при использовании поверхностей с высоким поглощением света. На рис. 5б продемонстрированы полученные шликрен-методом карты толщин плёнки жидкости в процессе испарения капли воды на нагретой до  $40^\circ\text{C}$  подложке, шкала для толщины приведена справа в мкм. На картинках можно увидеть появившиеся разрывы в капле жидкости. Для нелетучей жидкости на последних стадиях испарения на периферии капли образовывался жидкий валик, далее происходил разрыв тонкой плёнки жидкости ближе к центру испаряющейся капли, и образовывалось кольцо. На рис. 6а приведена серия шликрен-изображений, где отчётливо виден процесс разрыва капли жидкости и образование кольца. Также можно видеть, что разрыв происходит в месте, где на подложке есть существенный пик в структуре изначально. Образование кольца с определением всех толщин с помощью разработанного программного обеспечения продемонстрировано на рис. 6б. Картина соответствует последнему шликрен-изображению на рис. 6а. Видно, что для этого изображения толщина кольца менее 4,2 мкм. Также замечено, что фрагментация капель может происходить намного быстрее для летучих жидкостей.

На основе данных, полученных шликрен-методом, созданная программа рассчитывает скорость испарения (рис. 7), которая определяется как удельный расход испарившейся жидкости, т.е. разность объёмов жидкости умножается на плотность и делится на разницу времени и площадь поверхности. На рис. 7 видно, что скорость испарения возрастает на последней стадии испарения. С использованием шликрен-измерений подтверждено, что происходит быстрое увеличение удельной скорости испарения на последней стадии испарения



**Рис. 6.** Образование «кольца» после разрыва. (а) Серия шлирен-изображений капли воды, испаряющейся на нагреваемой b-Si подложке с начальной температурой 40 °С. (б) Полученная шлирен-методом 3D-карта толщины капли воды, испаряющейся на нагреваемой b-Si подложке с начальной температурой 40 °С. Картина соответствует последнему шлирен-изображению

**Fig. 6.** Formation of a “ring” after rupture. (a) A series of Schlieren images of a drop of water evaporating on a heated b-Si substrate with an initial temperature of 40 °C. (б) 3D map of the thickness of water droplet evaporating on heating b-Si substrate with initial temperature of 40 °C obtained by the Schlieren method. The map corresponds to the last schlieren image



**Рис. 7.** Удельный расход испарившейся жидкости на последней стадии испарения капли жидкости. Результаты получены с помощью разработанного программного обеспечения для обработки данных шлирен-изображений. (а) Вода при различных температурах подложки, пустые значки получены по асимптотической формуле из работы [20]; (б) FC-72 (perfluorohexane, C<sub>6</sub>F<sub>14</sub>) при различных температурах подложки. Здесь  $t_{0i}$  — общее время измерения для каждого экспериментального режима, соответственно  $t_{0i} - t$  — реальное время измерений

**Fig. 7.** Specific evaporation rate at the final stage of liquid droplet evaporation. The results were obtained using the developed software for processing Schlieren image data. (a) Water at different substrate temperatures, empty symbols are calculated by the asymptotic formula from Ref. [20]; (б) FC-72 (perfluorohexane, C<sub>6</sub>F<sub>14</sub>) at different substrate temperatures. Here  $t_{0i}$  is the total measurement time for each experimental mode, respectively,  $t_{0i} - t$  is the real measurement time

капли нанолитрового размера. Асимптотическая формула для удельной скорости испарения на последней стадии испарения капли жидкости, описанная в [20], хорошо согласу-

ется с результатами, полученными шлирен-методом (рис. 7а) [27]. Таким образом, шлирен-методом получаем качественные и количественные данные о деформациях поверхности

жидкости, об эволюции толщины плёнки жидкости и интенсивности испарения в зависимости от температуры подложки и типа жидкости. Разработанные методика измерений и программное обеспечение могут быть применены в дальнейших исследованиях. Показано, что данный шпирен-метод применим для измерения оттекающего краевого угла смачивания.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Развиты трёхмерные оптические методы измерения абсолютных величин толщины нагреваемых тонких плёнок жидкости. Метод интерферометрии с анализом изображений для измерения толщин капель и плёнок жидкости позволил исследовать последнюю стадию испарения капли жидкости, когда высота капли составляет несколько микрометров, а краевой угол смачивания становится трудно измеримым с помощью теневого метода, поскольку его значение менее  $10^\circ$ . Используемая оптическая интерференционная система позволила определить толщины плёнок до 40 нм и определить краевые углы смачивания менее  $10^\circ$  в динамике.

Второй метод, рассмотренный в данной работе, — это шпирен-метод с использованием

ступенчатого фильтра. Получены карты толщин и деформаций плёнки жидкости. Оптическая система, использованная в данной работе, позволила измерить толщины плёнок жидкости до 2 мкм. Причём использование подложек с хорошей поглощающей свет способностью является необходимым для измерения абсолютных величин толщины тонкой плёнки жидкости. Метод позволяет очень эффективно измерять толщину в динамике с высокой скоростью, площадь поверхности и объём жидкости, а также характеризовать множественные разрывы плёнок жидкости, происходящие при интенсивном испарении и нагреве.

Специально разработанные программы для шпирен- и интерференционного методов дают возможность вычислить скорость испарения, что позволяет исследовать динамику испарения во времени. Оба метода могут быть использованы для определения оттекающих краевых углов смачивания.

Таким образом продемонстрировано, что интерференционный и усовершенствованный шпирен-метод могут быть успешно применены к нескольким важным задачам, связанным с изучением нагреваемых тонких плёнок и капель жидкости с фазовым переходом.

## СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Gomit G., Chatellier L., David L. Free-surface flow measurements by non-intrusive methods: a survey // *Experiments in Fluids*. 2022. V. 63. № 6. P. 94. <https://doi.org/10.1007/s00348-022-03450-5>
2. Douchamps D., Devriendt D., Capart H., Craeye C., Macq B., Zech Y. Stereoscopic and velocimetric reconstructions of the free surface topography of antidune flows // *Experiments in Fluids*. 2005. V. 39. P. 535–553. <https://doi.org/10.1007/s00348-005-0983-7>
3. Chatellier L., Jarny S., Gibouin F., David L. A parametric PIV/DIC method for the measurement of free surface flows // *Experiments in fluids*. 2013. V. 54. P. 1–15. <https://doi.org/10.1007/s00348-013-1488-4>
4. Ferreira E., Chandler J., Wackrow R., Shiono K. Automated extraction of free surface topography using SfM-MVS photogrammetry // *Flow Measurement and Instrumentation*. 2017. V. 54. P. 243–249. <https://doi.org/10.1016/j.flowmeasinst.2017.02.001>
5. Van Meerkerk M., Poelma C., Westerweel J. Scanning stereo-PLIF method for free surface measurements in large 3D domains // *Experiments in Fluids*. 2020. V. 61. № 1. P. 19. <https://doi.org/10.1007/s00348-019-2846-7>
6. Cobelli P. J., Maurel A., Pagneux V., Petitjeans P. Global measurement of water waves by Fourier transform profilometry // *Experiments in fluids*. 2009. V. 46. № 6. P. 1037–1047. <https://doi.org/10.1007/s00348-009-0611-z>

## REFERENCES

1. Gomit G., Chatellier L., David L. Free-surface flow measurements by non-intrusive methods: a survey // *Experiments in Fluids*. 2022. V. 63. № 6. P. 94. <https://doi.org/10.1007/s00348-022-03450-5>
2. Douchamps D., Devriendt D., Capart H. et al. Stereoscopic and velocimetric reconstructions of the free surface topography of antidune flows // *Experiments in Fluids*. 2005. V. 39. P. 535–553. <https://doi.org/10.1007/s00348-005-0983-7>
3. Chatellier L., Jarny S., Gibouin F., David L. A parametric PIV/DIC method for the measurement of free surface flows // *Experiments in fluids*. 2013. V. 54. P. 1–15. <https://doi.org/10.1007/s00348-013-1488-4>
4. Ferreira E., Chandler J., Wackrow R., Shiono K. Automated extraction of free surface topography using SfM-MVS photogrammetry // *Flow Measurement and Instrumentation*. 2017. V. 54. P. 243–249. <https://doi.org/10.1016/j.flowmeasinst.2017.02.001>
5. Van Meerkerk M., Poelma C., Westerweel J. Scanning stereo-PLIF method for free surface measurements in large 3D domains // *Experiments in Fluids*. 2020. V. 61. № 1. P. 19. <https://doi.org/10.1007/s00348-019-2846-7>
6. Cobelli P. J., Maurel A., Pagneux V., Petitjeans P. Global measurement of water waves by Fourier transform profilometry // *Experiments in fluids*. 2009. V. 46. № 6. P. 1037–1047. <https://doi.org/10.1007/s00348-009-0611-z>

7. Moisy F., Rabaud M., Salsac K. A synthetic Schlieren method for the measurement of the topography of a liquid interface // *Experiments in Fluids*. 2009. V. 46. № 6. P. 1021–1036. <https://doi.org/10.1007/s00348-008-0608-z>
8. Engelen L., Greelle S., Schindfessel L., De Mulder T. Spatio-temporal image-based parametric water surface reconstruction: a novel methodology based on refraction // *Measurement Science and Technology*. 2018. V. 29. № 3. P. 035302. <https://doi.org/10.1088/1361-6501/aa9eb7>
9. Kiefhaber D., Caulliez G., Zappa C.J., Schaper J., Jahne B. Water wave measurement from stereo images of specular reflections // *Measurement Science and Technology*. 2015. V. 26. № 11. P. 115401. <https://doi.org/10.1088/0957-0233/26/11/115401>
10. Aureli F., Dazzi S., Maranzoni A., Mignosa P. A combined colour-infrared imaging technique for measuring water surface over non-horizontal bottom // *Experiments in fluids*. 2014. V. 55. P. 1–14. <https://doi.org/10.1007/s00348-014-1701-0>
11. Hewitt G.F., Hall-Taylor N.S., *Annular two-phase flow*. Oxford, New York, Toronto, Sydney, Braunschweig: Elsevier, Pergamon Press, 1970. P. 310. <https://doi.org/10.1016/C2009-0-06773-7>
12. Hewitt G.F., Lovegrove P.C., Nicholls B. Film thickness measurement using a fluorescence technique. Part 1. Description of the method // *Chemical Engineering Division, Atomic Energy Research Establishment, Harwell, 1964*. P. 4478.
13. Shoji E., Kaneko T., Yonemura T. et al. Measurement of dynamic wetting using phase-shifting imaging ellipsometer: comparison of pure solvent and nanoparticle suspension on film thickness profile, apparent contact angle, and precursor film length // *Experiments in Fluids*. 2021. V. 62. P. 206. <https://doi.org/10.1007/s00348-021-03296-3>
14. Maestro A., Gutfreund P. In situ determination of the structure and composition of Langmuir monolayers at the air/water interface by neutron and X-ray reflectivity and ellipsometry // *Advances in Colloid and Interface Science*. 2021. V. 293. P. 102434. <https://doi.org/10.1016/j.cis.2021.102434>
15. Panchangam S.S., Chatterjee A., Plawsky J.L., Wayner Jr.P.C. Comprehensive experimental and theoretical study of fluid flow and heat transfer in a microscopic evaporating meniscus in a miniature heat exchanger // *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 2008. V. 51. № 21–22. P. 5368–5379. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2008.03.023>
16. Hanchak M.S., Vangsness M.D., Byrd L.W. et al. Profile measurements of thin liquid films using reflectometry // *Applied Physics Letters*. 2013. V. 103. № 21. P. 211607. <https://doi.org/10.1063/1.4833855>
17. Settles G.S. *Schlieren and shadowgraph techniques: visualizing phenomena in transparent media*. Heidelberg: Springer Science & Business Media, Springer Berlin. 2001. XVIII. P. 376. <https://doi.org/10.1007/978-3-642-56640-0>
18. Unterberg W. *Studies of liquid film flow and evaporation with reference to saline water distillation*. Los Angeles: Department of Engineering, University of California, Rept. № 61–26. 1961.
19. Alekseenko S., Antipin V., Cherdantsev A. et al. Two-wave structure of liquid film and wave interrelation in annular gas-liquid flow with and without entrainment // *Physics of Fluids*. 2009. V. 21. № 6. P. 061701. <https://doi.org/10.1063/1.3151999>
7. Moisy F., Rabaud M., Salsac K. A synthetic Schlieren method for the measurement of the topography of a liquid interface // *Experiments in Fluids*. 2009. V. 46. № 6. P. 1021–1036. <https://doi.org/10.1007/s00348-008-0608-z>
8. Engelen L., Greelle S., Schindfessel L., De Mulder T. Spatio-temporal image-based parametric water surface reconstruction: a novel methodology based on refraction // *Measurement Science and Technology*. 2018. V. 29. № 3. P. 035302. <https://doi.org/10.1088/1361-6501/aa9eb7>
9. Kiefhaber D., Caulliez G., Zappa C.J. et al. Water wave measurement from stereo images of specular reflections // *Measurement Science and Technology*. 2015. V. 26. № 11. P. 115401. <https://doi.org/10.1088/0957-0233/26/11/115401>
10. Aureli F., Dazzi S., Maranzoni A., Mignosa P. A combined colour-infrared imaging technique for measuring water surface over non-horizontal bottom // *Experiments in fluids*. 2014. V. 55. P. 1–14. <https://doi.org/10.1007/s00348-014-1701-0>
11. Hewitt G.F., Hall-Taylor N.S., *Annular two-phase flow*. Elsevier, Pergamon Press, Oxford, New York, Toronto, Sydney, Braunschweig, 1970. P. 310. <https://doi.org/10.1016/C2009-0-06773-7>
12. Hewitt G.F., Lovegrove P.C., Nicholls B. Film thickness measurement using a fluorescence technique. Part 1. Description of the method. // *Chemical Engineering Division, Atomic Energy Research Establishment, Harwell, 1964*. P. 4478.
13. Shoji E., Kaneko T., Yonemura T. et al. Measurement of dynamic wetting using phase-shifting imaging ellipsometer: comparison of pure solvent and nanoparticle suspension on film thickness profile, apparent contact angle, and precursor film length // *Experiments in Fluids*. 2021. V. 62. P. 206. <https://doi.org/10.1007/s00348-021-03296-3>
14. Maestro A., Gutfreund P. In situ determination of the structure and composition of Langmuir monolayers at the air/water interface by neutron and X-ray reflectivity and ellipsometry // *Advances in Colloid and Interface Science*. 2021. V. 293. P. 102434. <https://doi.org/10.1016/j.cis.2021.102434>
15. Panchangam S.S., Chatterjee A., Plawsky J.L., Wayner Jr.P.C. Comprehensive experimental and theoretical study of fluid flow and heat transfer in a microscopic evaporating meniscus in a miniature heat exchanger // *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 2008. V. 51. № 21–22. P. 5368–5379. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2008.03.023>
16. Hanchak M.S., Vangsness M.D., Byrd L.W. et al. Profile measurements of thin liquid films using reflectometry // *Applied Physics Letters*. 2013. V. 103. № 21. P. 211607. <https://doi.org/10.1063/1.4833855>
17. Settles G.S. *Schlieren and shadowgraph techniques: visualizing phenomena in transparent media* // Springer Science & Business Media, Springer Berlin, Heidelberg. 2001. XVIII. P. 376. <https://doi.org/10.1007/978-3-642-56640-0>
18. Unterberg W. *Studies of liquid film flow and evaporation with reference to saline water distillation* // Department of Engineering, University of California, Los Angeles, Rept. № 61–26. 1961.
19. Alekseenko S., Antipin V., Cherdantsev A. et al. Two-wave structure of liquid film and wave interrelation in annular gas-liquid flow with and without entrainment // *Physics of Fluids*. 2009. V. 21. № 6. P. 061701. <https://doi.org/10.1063/1.3151999>

20. Gatapova E.Y., Shonina A.M., Safonov A.I., Sulyaeva V.S., Kabov O.A. Evaporation dynamics of a sessile droplet on glass surfaces with fluoropolymer coatings: focusing on the final stage of thin droplet evaporation // *Soft Matter*. 2018. V. 14. № 10. P. 1811–1821. <https://doi.org/10.1039/C7SM02192E>
21. Truong J.G., Wayner Jr.P.C. Effects of capillary and van der Waals dispersion forces on the equilibrium profile of a wetting liquid: Theory and experiment // *The Journal of chemical physics*. 1987. V. 87. № 7. P. 4180–4188. <https://doi.org/10.1063/1.452922>
22. Пещенюк Ю.А., Семенов А.А., Айвазян Г.Е., Лебедев М.С., Гатапова Е.Я. Рост пузыря в капле летучей жидкости: динамика межфазной границы // *Теплофизика и аэромеханика*. 2022. Т. 29. № 6. С. 1019–1027. <https://doi.org/10.1134/S0869864322060178>
23. Verma G., Yadav G., Saraj C.S., Li L., Miljkovic N., Delville J.P., Li W. A versatile interferometric technique for probing the thermophysical properties of complex fluids // *Light: Science & Applications*. 2022. V. 11. № 1. P. 115. <https://doi.org/10.1038/s41377-022-00796-7>
24. Чеканов В.В., Кандаурова Н.В., Чеканов В.С., Романцев В.В. Применение электроуправляемой интерференции для наблюдения автоволнового процесса в приэлектродном слое магнитной жидкости и в электроперестраиваемом цветном фильтре // *Оптический журнал*. 2019. Т. 86. № 1. С. 21–26. <http://doi.org/10.17586/1023-5086-2019-86-01-21-26>
25. Гуров И.П., Капранова В.О. Оценивание параметров интерференционных полос на основе модифицированного алгоритма адаптивной фильтрации Винера // *Оптический журнал*. 2021. Т. 88. № 2. С. 27–34. <http://doi.org/10.17586/1023-5086-2021-88-02-27-34>
26. Ахмеджанов И.М., Баранов Д.В., Заведеев Е.В., Дешпандэ Руча А., Божевольный С.И. Характеризация плазмонных метаповерхностей с помощью сканирующей интерферометрии белого света // *Оптический журнал*. 2022. Т. 98. № 7. С. 13–26. <http://doi.org/10.17586/1023-5086-2022-89-07-13-26>
27. Peschenyuk Y.A., Semenov A.A., Ayvazyan G.Y., Gatapova E.Y. The final stage of droplet evaporation on black silicon by schlieren technique with a graded filter // *Experiments in Fluids*. 2023. V. 64. № 1. P. 1. <https://doi.org/10.1007/s00348-022-03541-3>
20. Gatapova E.Y., Shonina A.M., Safonov A.I. et al. Evaporation dynamics of a sessile droplet on glass surfaces with fluoropolymer coatings: focusing on the final stage of thin droplet evaporation // *Soft Matter*. 2018. V. 14. № 10. P. 1811–1821. <https://doi.org/10.1039/C7SM02192E>
21. Truong J.G., Wayner Jr.P.C. Effects of capillary and van der Waals dispersion forces on the equilibrium profile of a wetting liquid: Theory and experiment // *The Journal of chemical physics*. 1987. V. 87. № 7. P. 4180–4188. <https://doi.org/10.1063/1.452922>
22. Peschenyuk Y.A., Semenov A.A., Ayvazyan G.Y. et al. Bubble growth in a volatile liquid drop: interface dynamics // *Thermophysics and Aeromechanics*. 2022. V. 29. № 6. P. 965–973. <https://doi.org/10.1134/S0869864322060178>
23. Verma G., Yadav G., Saraj C.S. et al. A versatile interferometric technique for probing the thermophysical properties of complex fluids // *Light: Science & Applications*. 2022. Vol. 11. № 1. P. 115. <https://doi.org/10.1038/s41377-022-00796-7>
24. Chekanov V.V., Kandaurova N.V., Chekanov V.S., Romansev V.V. Application of electrically controlled interference for observing the autowave process in the near-electrode layer of a magnetic fluid and in an electrically tunable color filter // *Journal of Optical Technology*. 2019. V. 86. № 1. P. 16–20. <https://doi.org/10.1364/JOT.86.00001625>
25. Gurov I.P., Kapranova V.O. Assessment of parameters of interference fringes using a modified algorithm for adaptive Wiener filtering // *Journal of Optical Technology*. 2021. V. 88. № 2. P. 77–82. <https://doi.org/10.1364/JOT.88.00007726>
26. Akhmedzhanov I.M., Baranov D.V., Zavedeev E.V. et al. Characterization of gap-plasmon-based metasurfaces with scanning white-light interferometry // *Journal of Optical Technology*. 2022. V. 89. № 7. P. 378–387. <https://doi.org/10.1364/JOT.89.0000378>
27. Peschenyuk Y.A., Semenov A.A., Ayvazyan G.Y., Gatapova E.Y. The final stage of droplet evaporation on black silicon by schlieren technique with a graded filter // *Experiments in Fluids*. 2023. V. 64. № 1. P. 1. <https://doi.org/10.1007/s00348-022-03541-3>

## АВТОРЫ

**Елизавета Яковлевна Гатапова** — канд. физ.-мат. наук, старший научный сотрудник, Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе Сибирского отделения Российской академии наук, 630090, Новосибирск, Россия; доцент, Новосибирский государственный университет, 630090, Новосибирск, Россия; Scopus ID: 9242551900, <https://orcid.org/0000-0002-8152-6690>, [gatapova@itp.nsc.ru](mailto:gatapova@itp.nsc.ru)

**Юлия Александровна Пещенюк** — инженер-исследователь, Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе Сибирского отделения Российской академии наук, 630090, Новосибирск, Россия; Scopus ID: 57992722900, <https://orcid.org/0000-0002-2237-3583>, [peschenyuk.yulya@gmail.com](mailto:peschenyuk.yulya@gmail.com)

## AUTHORS

**Elizaveta Ya. Gatapova** — PhD in Physics and Mathematics, Senior Researcher, Kutateladze Institute of Thermophysics of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, 630090, Novosibirsk, Russia; Associate Professor, Novosibirsk State University, 630090, Novosibirsk, Russia; Scopus ID: 9242551900, <https://orcid.org/0000-0002-8152-6690>, [gatapova@itp.nsc.ru](mailto:gatapova@itp.nsc.ru)

**Yulia A. Peschenyuk** — Research Engineer, Kutateladze Institute of Thermophysics of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, 630090, Novosibirsk, Russia; Scopus ID: 57992722900, <https://orcid.org/0000-0002-2237-3583>, [peschenyuk.yulya@gmail.com](mailto:peschenyuk.yulya@gmail.com)