

DOI: 10.17586/1023-5086-2024-91-01-14-24

УДК 535.314

Исследование особенностей профиля поверхности капли жидкости методом каустик лазерного излучения

Анастасия Вячеславовна Ведяшкина¹✉, Ирина Львовна Расковская²,
Илья Николаевич Павлов³

¹Особое конструкторское бюро Московского энергетического института, Москва, Россия

^{2, 3}Национальный исследовательский университет «МЭИ», Москва, Россия

¹an.vedyashkina@gmail.com

<https://orcid.org/0000-0002-2670-7712>

²raskovskail@mail.ru

<https://orcid.org/0000-0002-1231-9479>

³inpavlov@bk.ru

<http://orcid.org/0000-0002-9014-6294>

Аннотация

Предмет исследования. Особенности профиля поверхности капли жидкости, лежащей на прозрачной подложке. Исследование основывается на оптическом явлении образования каустик — ярких линий, наблюдаемых на экране при зондировании капли лазерным излучением. **Цель работы.** Обоснование возможностей применения метода каустик лазерного излучения для получения дополнительной информации о микрорельефе и диагностики особенностей профиля поверхности капли жидкости, лежащей на прозрачной подложке. **Метод.** В основе метода каустик лазерного излучения лежат зондирование объекта исследования лазерным пучком и оценка его характеристик по геометрическим параметрам регистрируемых каустик, возникающих в результате рефракции или отражения. В отличие от других оптических методов метод каустик позволяет определять линии перегиба поверхности в модели капли и их положение с помощью геометрических параметров каустик, которые регистрируются в процессе эксперимента. **Основные результаты.** Исследование показало, что метод каустик лазерного излучения может применяться для диагностики особенностей профиля поверхности капли жидкости и служить источником дополнительной информации о микрорельефе поверхности капли при применении существующих оптических методов. В работе представлены результаты компьютерного моделирования рефракции лазерного излучения и формирования каустик при зондировании капель жидкости с различной формой профиля поверхности. Объяснено возникновение линий с резко возрастающей интенсивностью светового поля на рефракционном изображении, наблюдаемых в ряде экспериментов по зондированию капли жидкости широким коллимированным лазерным пучком. **Практическая значимость.** Продемонстрированные в работе новые возможности применения метода каустик лазерного излучения позволяют усовершенствовать существующие оптические методы исследования процессов смачивания и растекания капель и пленок по твердой поверхности без применения дорогостоящего оборудования.

Ключевые слова: метод каустик, оптика катастроф, лазерная рефрактография, пограничный слой жидкости, краевой угол смачивания

Ссылка для цитирования: Ведяшкина А.В., Расковская И.Л., Павлов И.Н. Исследование особенностей профиля поверхности капли жидкости методом каустик лазерного излучения // Оптический журнал. 2024. Т. 91. № 1. С. 14–24. <http://doi.org/10.17586/1023-5086-2024-91-01-14-24>

Коды OCIS: 120.5710, 260.2710, 120.4820

Investigation of the liquid droplet surface profile features using the laser caustic method

ANASTASIA V. VEDYASHKINA¹✉, IRINA L. RASKOVSKAYA², ILYA N. PAVLOV³

¹Special Design Bureau of the Moscow Power Engineering Institute, Moscow, Russia

^{2, 3}National Research University MPEI, Moscow, Russia

¹an.vedyashkina@gmail.com <https://orcid.org/0000-0002-2670-7712>

²raskovskail@mail.ru <https://orcid.org/0000-0002-1231-9479>

³inpavlov@bk.ru <http://orcid.org/0000-0002-9014-6294>

Abstract

Subject of research. The surface profile characteristic of a liquid drop lying on a transparent substrate. The research is based on the optical phenomenon of caustic formation that appears on the screen when droplet is probed by laser radiation. **Purpose of the study.** Justification of the possibilities of using the caustic laser radiation method to obtain additional information about the microrelief and diagnose the features of the surface profile of a liquid drop lying on a transparent substrate. **Method.** The employed method of laser caustic involves probing of the studied object with a beam of light and evaluating its characteristics by the geometric parameters of the caustic surfaces formed during refraction or reflection. The key distinction of the caustic method from classical optical methods lies in the ability to determine inflection points of the curve in the heterogeneity model and their locations using the geometric parameters of caustics recorded during the experiment. **Main results.** The study shows that by using the laser caustic method, it is possible to diagnose the properties of the liquid droplet's surface profile and acquire supplementary data regarding both macro- and micro-relief of the droplet surface when working with established optical techniques. The article presents the results of computer modeling of laser radiation refraction and caustic formation when probing liquid droplets with various surface profile shapes. The emergence of lines with sharply increasing intensity of the light field on the refraction image, which are observed in a series of experiments involving wide collimated laser beams to probe liquid droplets, is explained. **Practical significance.** The paper demonstrates the new possibilities of applying the laser caustic method in the study of wetting and spreading processes of droplets and films on solid surfaces, that allows to improve of existing optical research methods without the need for expensive equipment.

Keywords: caustic method, catastrophe optics, laser refractography, liquid boundary layer, contact angle

For citation: Vedyashkina A.V., Raskovskaya I.L., Pavlov I.N. Investigation of the liquid droplet surface profile features using the laser caustic method [in Russian] // Opticheskii Zhurnal. 2024. V. 91. № 1. P. 14–24. <http://doi.org/10.17586/1023-5086-2024-91-01-14-24>

OCIS codes: 120.5710, 260.2710, 120.4820

ВВЕДЕНИЕ

Исследование процессов смачивания и растекания жидких капель и пленок по твердым поверхностям представляет собой одну из фундаментальных задач в области физики жидкостей и теплообмена. Это важное направление находит применение во многих областях, включая промышленность, сельское хозяйство и медицину. Особое внимание при исследовании смачивания и растекания уделяется также процессам конденсации, испарения и многофазным течениям. В различных научных и производственных областях

от аэрокосмической техники до производства гидрогелевых контактных линз важной задачей является измерение краевых углов контакта жидкости с твердыми телами. Информация о краевых углах необходима для исследования адгезии в гранулированных материалах и для диагностики капиллярных явлений.

Существует ряд оптических методов, позволяющих определять краевой угол и исследовать профиль капли. Среди них наиболее распространенным благодаря своей простоте является метод сидящей капли, когда

капля жидкости наблюдается сбоку через гониометр [1].

Применяемые в настоящее время оптические методы определения краевого угла смачивания не являются универсальными и не предоставляют полную информацию о характеристиках поверхности (макро- и микрорельеф поверхности капли) и их динамике в процессе испарения капли. Большинство подходов сосредоточены на измерении макроскопического контактного угла и рассматривают его как ключевой фактор, влияющий на растекание капли. Однако геометрия края и особенно профиль области вблизи линии трехфазного контакта также являются важными для описания характеристик растекания капли. Комплексное применение различных оптических методов позволяет получить дополнительную информацию. В связи с указанным выше существенно важным представляются развитие и совершенствование существующих оптических методов, а также предложение новых подходов для количественной оценки динамики краевого угла и параметров макро- и микрорельефа поверхности капли.

В ряде экспериментов при зондировании капли, лежащей на прозрачной подложке, широким коллимированным лазерным пучком на экране наблюдались каустики — области, где интенсивность светового поля резко возрастала [2–4].

В данной статье рассматривается предположение, что каустика, или оптическая катастрофа, возникающая в результате преломления лазерных лучей каплей, несет в себе дополнительную информацию о растекании и испарении капли, а конфигурации рефракционных изображений зависят от времени и от свойств капли. Таким образом, целью данной работы является обоснование возможностей применения метода каустик лазерного излучения для получения дополнительной информации о макро- и микрорельефе и диагностики особенностей профиля поверхности капли жидкости, лежащей на прозрачной подложке.

МЕТОД КАУСТИК ОПТИЧЕСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

Под каустическими поверхностями понимаем огибающие семейства лучей [5]. Каустики также характеризуются высокой интенсив-

ностью волнового поля, что обеспечивает возможность их наблюдения без использования специализированного оборудования. Кроме оптики, каустики являются источником дополнительной информации для решения прикладных задач в радиотехнике и акустике.

В основе метода каустик лазерного излучения лежат зондирование объекта исследования лазерным пучком и оценка его характеристик по геометрическим параметрам регистрируемых каустик, возникающих в результате рефракции или отражения. В отличие от других оптических методов метод каустик позволяет определять линии перегиба поверхности в модели капли и их положение, используя геометрические параметры каустик, которые регистрируются в процессе эксперимента. Этот метод не требует дорогостоящего оборудования, прост в реализации, эффективен в диагностике прочностных характеристик твердых материалов, помимо этого, широко применяется для оценки коэффициентов интенсивности статических и динамических напряжений в вершине трещины в разнородных изотропных и ортотропных материалах.

В настоящее время оптика катастроф успешно объясняет многие оптические явления в природе, при этом относительно невелика область применения метода каустик для количественного измерения параметров объектов исследования. Тем не менее, описанные в работах [6, 7] результаты применения метода каустик для определения напряжений и деформаций в изотропных и ортотропных средах свидетельствуют о его потенциале для адаптации к измерениям физических параметров сред в условиях образования каустик.

Помимо этого, исследование взаимосвязи параметров каустических поверхностей, возникающих при зондировании структурированным лазерным излучением неоднородной среды с существенным градиентом показателя преломления, способствовало развитию метода лазерной рефрактографии [8]. Описание применения метода каустик для качественной и количественной диагностики стратифицированных жидкостей приведено в публикациях [9–11]. В данном подходе зондирование исследуемой жидкой среды проводится структурированным лазерным излучением, которое представляет собой вертикальный плоский пучок заданной ширины. Через фронтальную

стенку кюветы, в которой находится оптическая неоднородность, в результате преломления лазерного излучения наблюдается рефракционная картина — рефрактограмма, которая регистрируется цифровой фотокамерой. Полученные рефрактограммы, содержащие каустики лазерного излучения, обрабатываются с использованием специального программного обеспечения на персональном компьютере. Так как в методе каустик ключевой является информация о форме и местоположении огибающей семейства лучей, а не значение интенсивности светового поля, френелевские потери при зондировании исследуемой среды и поляризация лазерного излучения не влияют на результаты экспериментов.

Алгоритм обработки экспериментальных рефракционных картин включает в себя моделирование распространения лазерного излучения в неоднородной среде с учетом теоретической параметрической модели распределения показателя преломления. Путем сравнения экспериментально полученных изображений с расчетными определяются параметры теоретической модели распределения показателя преломления. Местоположение каустик чувствительно к изменению свойств оптической неоднородности, что позволяет исследовать динамику параметров среды, таких как коэффициенты диффузии.

ФОРМИРОВАНИЕ КАУСТИК ПРИ ЗОНДИРОВАНИИ ЛАЗЕРНЫМ ИЗЛУЧЕНИЕМ КАПЛИ, ЛЕЖАЩЕЙ НА ПРОЗРАЧНОЙ ПОДЛОЖКЕ

Рассмотрим эксперимент с испаряющейся каплей воды, находящейся на горизонтальной прозрачной подложке. Схема эксперимента по зондированию широким коллимированным лазерным пучком капли воды представлена на рис. 1. Для проведения эксперимента используется следующая установка. Излучение гелий-неонового лазера фирмы JDSU мощностью 10 мВт и длиной волны 633 нм служит источником зондирующего излучения. Для формирования широкого коллимированного пучка диаметром 8 мм используется специальная оптическая система. Пучок направляется вертикально снизу вверх поворотной призмой. На поверхность прозрачной стеклянной подложки с шероховатостью 10 нм, измеренной

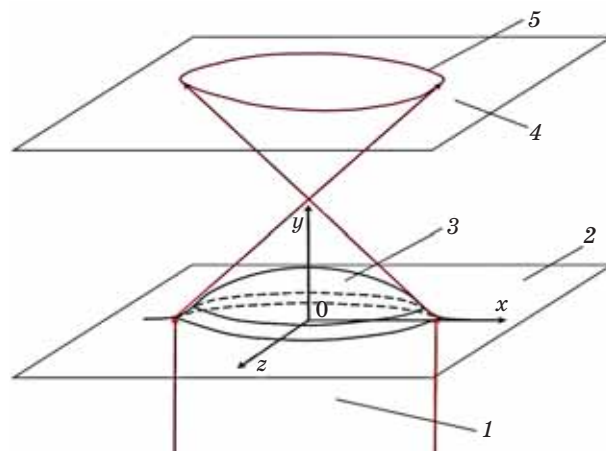


Рис. 1. Схема получения рефракционного изображения широкого коллимированного лазерного пучка, зондирующего каплю жидкости. 1 — лазерный пучок, 2 — прозрачная подложка, 3 — капля жидкости, 4 — экран, 5 — рефракционное изображение

Fig. 1. Scheme for obtaining a refractive image of a liquid drop probed by wide collimated laser beam. (1) Laser beam, (2) transparent substrate, (3) liquid drop, (4) screen, (5) refractive image

с помощью атомно-силового микроскопа, помещается объект исследования — капля жидкости. Лазерный пучок, пройдя через каплю, частично преломляется в ней, в то время как другая часть пучка проходит без искажения. После этого пучок попадает на экран, где формируется рефракционное изображение, регистрируемое цифровой камерой. Объем капли в эксперименте составляет 10 мкл, диаметр — 4 мм. Из-за относительно низкой плотности мощности лазерного излучения, попадающего на каплю, температурные изменения, вызванные лазерным излучением, в ходе эксперимента считаются пренебрежимо малыми. Более подробно условия проведения эксперимента и экспериментальная установка описаны в работе [2].

На рис. 2 демонстрируются результаты эксперимента по зондированию капли дистиллированной воды широким коллимированным лазерным пучком и динамика рефракционных изображений во времени.

Анализ рисунков показывает, что конфигурация изображения изменяется по мере испарения капли (изменения краевого угла), поскольку изображение чувствительно к форме края.

При испарении капли происходит уменьшение ее объема, при этом площадь пятна контакта между каплей жидкости и поверхностью остается постоянной, т.е. происходит уменьшение макроскопического краевого угла. Когда макроскопический краевой угол смачивания достигает определенного критического значения, происходит резкое изменение формы капли и площади пятна контакта (схлопывание). На рис. 2 момент схлопывания капли происходит на 51 минуте.

В описанном выше эксперименте объектом исследования была капля дистиллированной воды, однако на практике часто необходима диагностика капель, содержащих примеси. Метод каустик применим в случаях, если капля жидкости прозрачна, а показатель ее преломления одинаков в любой точке капли.

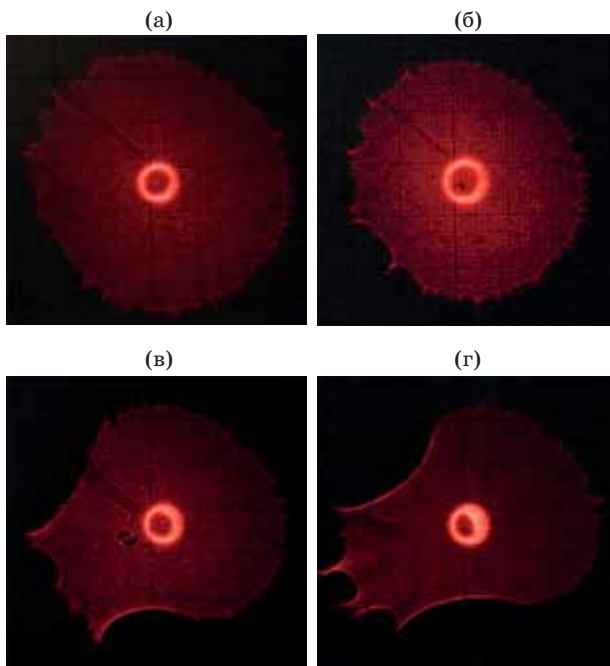


Рис. 2. Динамика изменения рефракционных изображений при испарении капли дистиллированной воды объемом 10 мкл на стеклянной подложке с шероховатостью 10 нм. Время от начала эксперимента 45 (а) 50 (б), 52 (в) и 59 (г) минут

Fig. 2. Dynamics of changes in refractive images during the evaporation of a distilled water drop with a volume of 10 μl on a glass substrate with a roughness of 10 nm. Time from the start of the experiment (a) 45, (b) 50, (v) 52, (r) 59 minutes

При зондировании широким лазерным пучком испаряющейся капли происходит преломление лучей, что создает на экране рефракционное изображение с характерным ярким контуром. В работе [12], посвященной оптике катастроф, приведены выводы о том, что фокусировка преломленных лучей приводит к образованию каустических поверхностей. Геометрическая оптика не позволяет должным образом описать интенсивность поля в области каустических поверхностей в эксперименте, однако с ее помощью можно показать, как формируется рефракционное изображение при наличии каустик.

Для моделирования зондирования лазерным пучком капли воды с показателем преломления n использовались схема, представленная на рис. 3, и описанные ниже соотношения. Пусть профиль капли в плоскости XOY описан с помощью модели $h(x)$, краевой угол в этой плоскости равен θ . Для единичного луча с координатой входа x_0 угол наклона касательной к поверхности капли в точке пересечения капли лазерным лучом равен θ_0 , таким образом, верно выражение

$$\text{tg}\theta_0 = \left. \frac{dh(x)}{dx} \right|_{x=x_0} \quad (1)$$

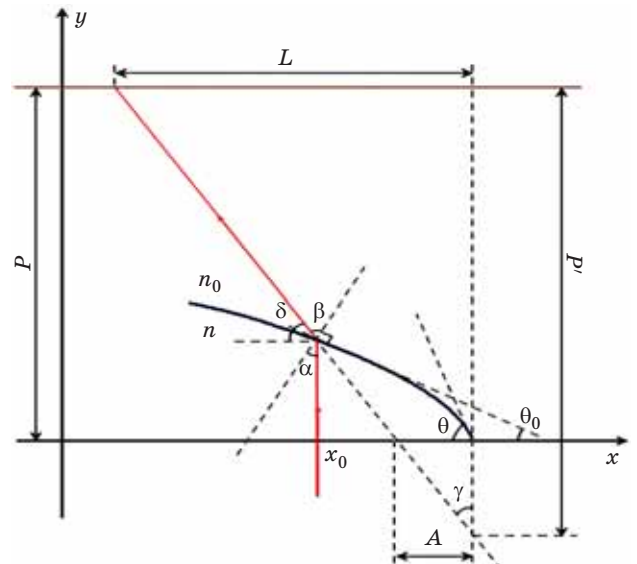


Рис. 3. Иллюстрация прохождения лазерного луча через каплю. Пояснения в тексте.

Fig. 3. Illustration of a laser beam probing a liquid drop. Explanations are in the text

Для определения угла отклонения лазерного луча с координатой входа x_0 от направления распространения после прохождения капли воспользуемся законом Снеллиуса

$$\frac{\sin \alpha}{\sin \beta} = \frac{n_0}{n}, \quad (2)$$

где n_0 в рассматриваемом случае — показатель преломления воздуха, равный 1. Расстояние между подложкой и экраном, на котором регистрируется рефракционная картина, равно P , расстояние между яркой линией и краем капли в плоскости экрана — L .

Из рис. 3 видно, что $\alpha = \theta_0$, а $\delta = \theta_0 + \pi/2 - \beta$. Тогда с учетом выражения (2)

$$\delta = \frac{\pi}{2} + \theta_0(1-n). \quad (3)$$

Таким образом, траектория распространения лазерного луча с точкой входа x_0 после прохождения капли описывается выражением

$$f_0(x) = \operatorname{tg} \left(\frac{\pi}{2} + \operatorname{arctg} \left(\frac{dh(x)}{dx} \Big|_{x=x_0} \right) (1-n) \right) \times (x-x_0) + h(x_0). \quad (4)$$

Для моделирования рефракции лучей также необходимо учесть условие полного внутреннего отражения: при $\theta_0 \geq \arcsin(1/n)$ лучи не преломляются, а отражаются от поверхности внутри капли.

Из результатов экспериментов, представленных в работах [13, 14], видно, что профиль капли вблизи линии контакта у разных жидкостей различается в разные моменты времени растекания капли, в частности это справедливо для испаряющейся неподвижной капли. Рассматриваемые в данной работе варианты осесимметричных профилей капли для исследования возникающих в результате зондирования каустик приведены на рис. 4.

Результаты компьютерного моделирования представлены на рис. 5.

Для моделирования профиль капли задавался кусочно-полиномиальной аппроксимацией, вблизи границы переходов полино-

миальных функций возникают погрешности моделирования, которые в дальнейшем необходимо учитывать при применении метода каустик в обработке экспериментальных рефракционных картин.

В работе [13] показано, что условием возникновения каустик является наличие точки перегиба в модели, описывающей поверхность капли, что также подтверждается приведенными выше результатами моделирования. Под точкой перегиба понимаем точку, в которой градиент функции уровня поверхности имеет экстремум. На рис. 6 представлено взаимное расположение лучей, преломленных каплей и образующих каустик, и положение характерных точек градиента функции профиля поверхности для рассматриваемых моделей.

Анализ рисунков показывает, что каустики формируют не только лучи, распространяющиеся вблизи точки, в которой градиент

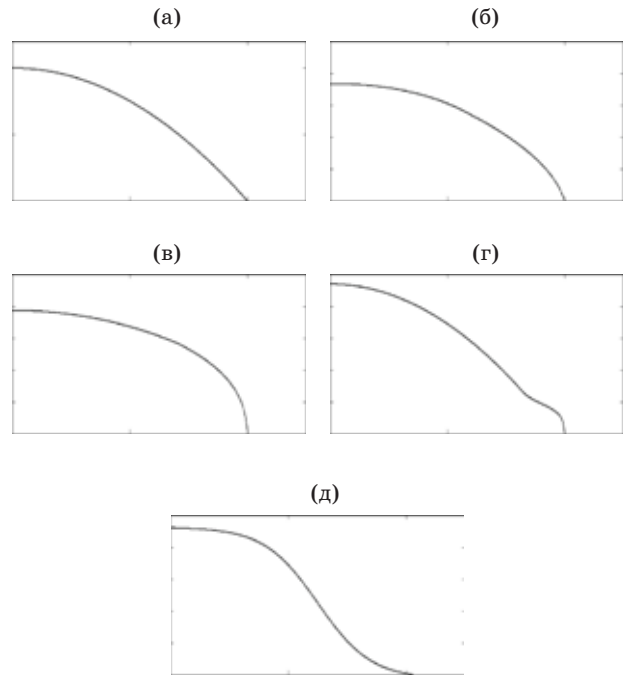


Рис. 4. Варианты профилей капли, используемых для моделирования зондирования лазерным пучком, с крайевыми углами $\theta = 45^\circ$ (а), $\theta = 68^\circ$ (б), $\theta = 86^\circ$ (в), профиль имеет точку перегиба, $\theta = 89^\circ$ (г), профиль имеет точку перегиба, $\theta = 2^\circ$ (д)

Fig. 4. Variants of the drop profiles used to simulate the probing with a laser beam. (a) $\theta = 45^\circ$, (б) $\theta = 68^\circ$, (в) $\theta = 86^\circ$, (г) the profile has an inflection point, $\theta = 89^\circ$, (д) the profile has an inflection point, $\theta = 2^\circ$

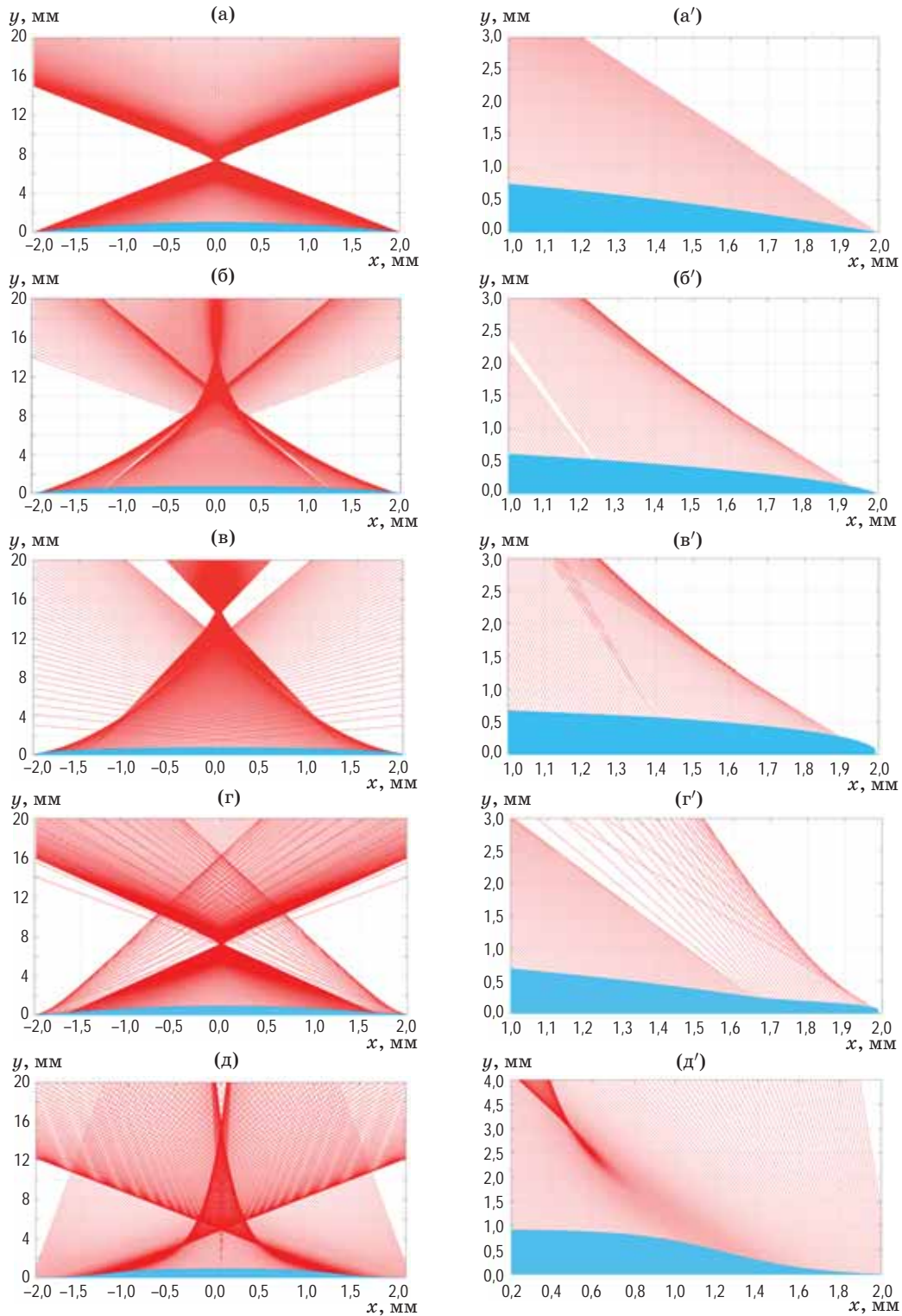


Рис. 5. Результаты моделирования зондирования осесимметричного профиля капли (а)–(д) и увеличенное изображение вблизи линии контакта (а')–(д'). Параметры профиля: (а), (а') $\theta = 45^\circ$, (б), (б') $\theta = 68^\circ$, (в), (в') $\theta = 86^\circ$, (г), (г') профиль имеет точку перегиба, $\theta = 89^\circ$, (д), (д') профиль имеет точку перегиба, $\theta = 2^\circ$

Fig. 5. (а)–(д) The results of modeling the laser beam probing for an axisymmetric drop profile and (а')–(д') zoom image near the contact line. Profile options: (а), (а') $\theta = 45^\circ$, (б), (б') $\theta = 68^\circ$, (в), (в') $\theta = 86^\circ$, (г), (г') the profile has an inflection point, $\theta = 89^\circ$, (д), (д') the profile has an inflection point, $\theta = 2^\circ$

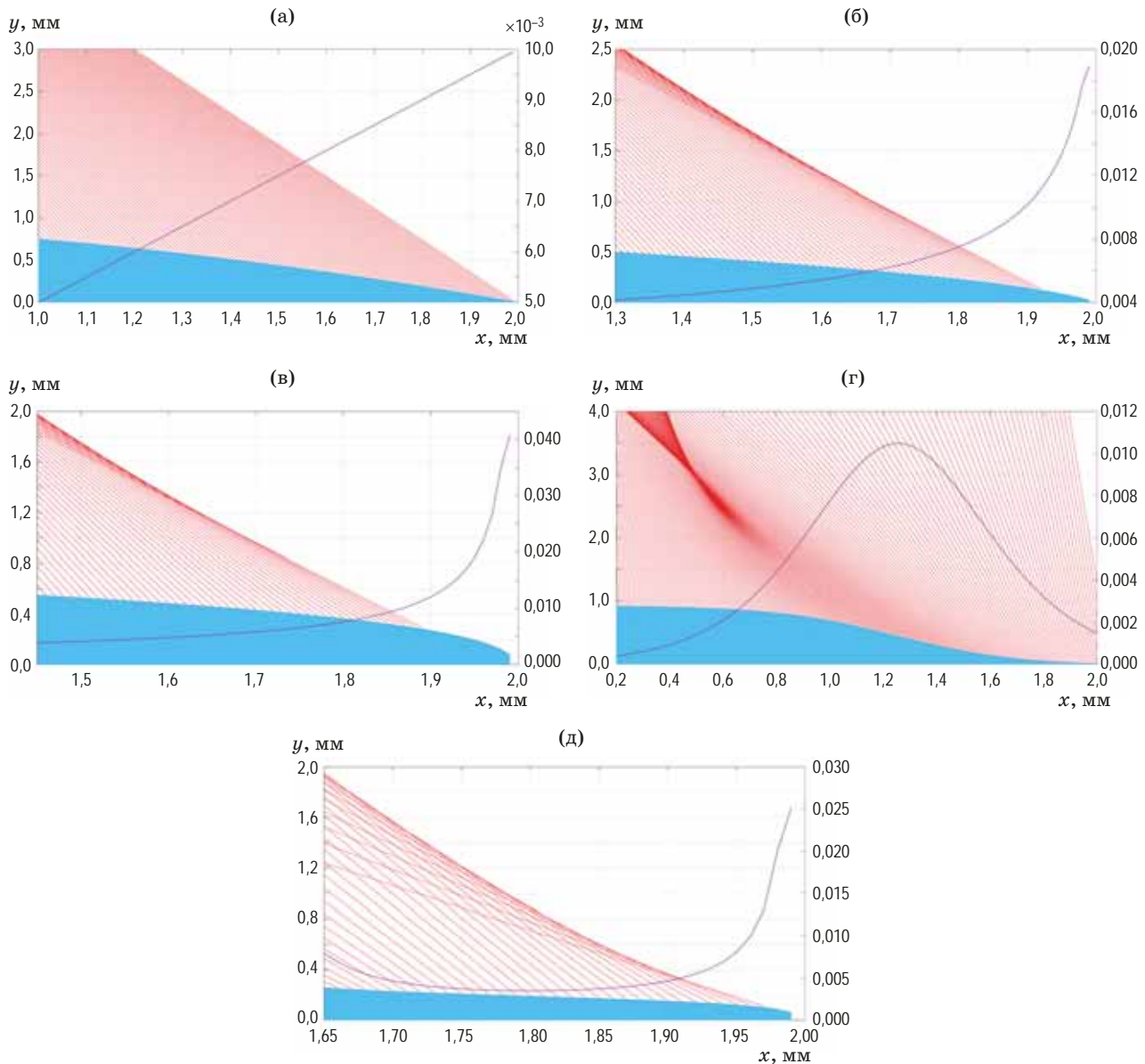


Рис. 6. Взаимное расположение лучей, преломленных каплей и образующих каустику, и градиент моделей $h(x)$ профилей капли с краевыми углами $\theta = 45^\circ$ (а), $\theta = 68^\circ$ (б), $\theta = 86^\circ$ (в), профиль имеет точку перегиба, $\theta = 89^\circ$ (г), профиль имеет точку перегиба, $\theta = 2^\circ$ (д)

Fig. 6. The relative position of the rays refracted by the drop and forming a caustic, and the gradient of the $h(x)$ models for the drop profiles: (a) $\theta = 45^\circ$, (б) $\theta = 68^\circ$, (в) $\theta = 86^\circ$, (г) the profile has an inflection point, $\theta = 89^\circ$, (д) the profile has an inflection point, $\theta = 2^\circ$

функции уровня поверхности имеет экстремум.

Рисунок 7 иллюстрирует формирование рефракционной картины в сечении XOY в трехмерном отображении в случае модели с точкой перегиба и углом $\theta = 2^\circ$.

Для решения обратной задачи рефракции и определения угла θ° по рефракционной картине в плоскости экрана вернемся к анализу рис. 3. Из рисунка видно, что $\gamma = \beta - \alpha$. Также $\text{tg} \gamma = L/P'$, $\text{tg} \gamma = A/(P' - P)$, тогда $P'(L - A) = LP$, следовательно, $P' \approx P$

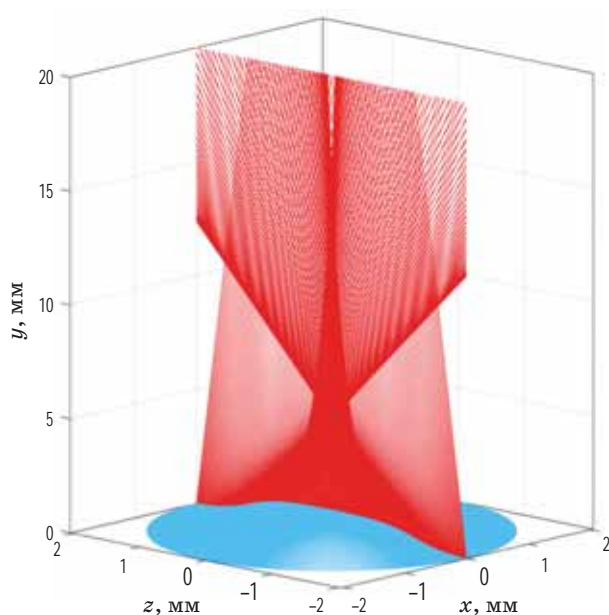


Рис. 7. Формирование рефракционной картины в сечении XOY в трехмерном отображении для модели с точкой перегиба и углом $\theta = 2^\circ$

Fig. 7. Formation of a refractive pattern in the XOY section in a three-dimensional visualization for a model with an inflection point and an angle $\theta = 2^\circ$

при $A \ll L$. С учетом выражения (2) и равенства углов α и θ_0 , угол θ_0 можно определить по выражению

$$\theta_0 = \frac{\arctg(L/P)}{n-1}. \quad (5)$$

Таким образом, по яркой линии, каустике, на рефракционной картине, формируемой на экране, можно определить угол наклона касательной к графику, описывающему модель профиля поверхности капли вблизи точки перегиба.

Анализ полученных выше результатов показывает, что при прохождении лазерного луча через каплю жидкости форма края капли оказывает существенное влияние на распределение света. Капля может действовать как линза, фокусирующая свет на удаленный экран. Однако из-за неоднородности формы капли возникают каустические поверхности, которые являются областями сосредоточения

интенсивного света. В процессе испарения капли на экране наблюдаются изменяющиеся с течением времени рефракционные изображения.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе продемонстрированы новые возможности применения метода каустик, известных также как оптические катастрофы. Показаны формирование каустик на рефракционном изображении лазерного пучка, зондирующего каплю жидкости, лежащую на прозрачной подложке, и возможность применения метода каустик для получения дополнительной информации о микрорельефе поверхности и диагностики особенностей профиля капли.

Анализ, основанный на оптике катастроф, интерпретирует формирование рефракционных изображений лазерного пучка, зондирующего каплю жидкости. Анализ показывает, что каустика, визуализирующаяся как яркая линия на экране, обусловлена линией перегиба кривой уровня поверхности жидкости вблизи линии контакта, которая может образовываться не только при растекании капель, но и при растекании пленок.

В работе представлены результаты компьютерного моделирования рефракции лазерного пучка при зондировании капли воды, лежащей на прозрачной подложке, в случае различных параметров ее профиля, а также объяснено возникновение каустик на экспериментальных рефракционных изображениях.

Продemonстрированные в работе новые возможности применения метода каустик лазерного излучения позволяют усовершенствовать существующие оптические методы исследования процессов смачивания и растекания капель и пленок по твердой поверхности без применения дорогостоящего оборудования.

Дальнейшая работа в данном направлении предполагает моделирование формирования каустик в плоскости экрана для различных форм рельефа поверхности капли вблизи линии контакта с целью получения изображений, приближенных к наблюдаемым в ходе экспериментов, что позволит исследовать особенности динамики микрорельефа поверхности капель и пленок.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Majumder B., Katarkar A., Bhaumik S. Effect of structured surface on contact angle using sessile droplet method // Publishing Ltd IOP Conf. Ser.: Materials Sci. and Eng. 2020. V. 814. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/814/1/012034>
2. 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. <https://doi.org/10.7868/S0044451017040058>
3. Павлов И.Н., Расковская И.Л., Ринкевичюс Б.С. Восстановление профиля поверхности капли жидкости на основе послойного лазерного зондирования // Письма в ЖТФ. 2017. Т. 43. № 13. С. 19–25. <https://doi.org/10.21883/PJTF.2017.13.44807.16745>
4. Chao F.D., Mcquillen J.B., Sankovic J.M., Zhang N. Catastrophe optics method to determine the micro-nano size profiles at TPL of liquid films on a solid surface // Proc. ASME 2009 2nd Micro/Nanoscale Heat and Mass Transfer Internat. Conf. P. MNHMT2009-18335. <https://doi.org/10.1115/MNHMT2009-18335>
5. Кравцов Ю.А., Орлов Ю.И. Геометрическая оптика неоднородных сред. М.: Наука, 1980. 304 с.
6. Yuana Y., Zhang Q., Sheng C., Zhanga Z. Theoretical model of caustics method for the interfacial cracks // Engineering Fracture Mechanics. 2020. V. 233. P. 107006. <https://doi.org/10.1016/j.engfracmech.2020.107006>
7. Qiu P., Yue Z., Yang R., Li J.C. Effects of vertical and horizontal reflected blast stress waves on running cracks by caustics method // Engineering Fracture Mechanics. 2019. V. 212. P. 164–179. <https://doi.org/10.1016/j.engfracmech.2019.03.018>
8. Rinkevichyus B.S., Evtikhieva O.A., Raskovskaya I.L. Laser refractography. N.Y.: Springer, 2010. 186 p. <https://doi.org/10.1007/978-1-4419-7397-9>
9. Ведяшкина А.В., Ринкевичюс Б.С., Павлов И.Н. Исследование диффузионного слоя жидкости с помощью рефракции структурированного лазерного излучения // Сб. науч. тр. VI Междунар. конф. по фотонике и информационной оптике. 2017. С. 217–218.
10. Ведяшкина А.В., Расковская И.Л., Павлов И.Н. Применение метода каустик для исследования процессов тепло- и массопереноса в жидкостях // Сб. науч. тр. X Междунар. конф. по фотонике и информационной оптике. 2021. С. 431–432.
11. Vedyashkina A.V., Rinkevichyus B.S., Raskovskaya I.L., Pavlov I.N. Laser radiation caustics method for quantitative diagnostic of transparent inhomogeneous media // Proc. Progress in Electromagnetics Research Symp. 2017. P. 754–758. <https://doi.org/10.1109/PIERS.2017.8261842>
12. Larkin S. Lasers and electro-optics research at the cutting edge. N.Y.: Nova, 2007. 293 p.
13. Zhang N., Chao F.D. Caustics and caustic-diffraction in laser shadowgraphy of a sessile drop and identification of profile near contact line // Opt. and Laser Technol. 2003. V. 35. P. 155–161. [https://doi.org/10.1016/S0030-3992\(02\)00161-5](https://doi.org/10.1016/S0030-3992(02)00161-5)
14. Šikalo Š., Wilhelm H.-D., Roisman I.V., Jakirlić S., Tropea C. Dynamic contact angle of spreading droplets: Experiments and simulations // Physics of Fluids. 2005. V. 17. P. 062103. <https://doi.org/10.1063/1.1928828>

REFERENCES

1. Majumder B., Katarkar A., Bhaumik S. Effect of structured surface on contact angle using sessile droplet method // Publishing Ltd IOP Conf. Ser.: Materials Sci. and Eng. 2020. V. 814. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/814/1/012034>
2. Pavlov I.N., Raskovskaya I.L., Tolkahev A.V. Structure of the surface microrelief of a droplet evaporating from a rough substrate as a possible cause of contact angle hysteresis // J. Experim. and Theor. Phys. 2017. V. 124. № 4. P. 570–579. <https://doi.org/10.1134/S1063776117030141>
3. Pavlov I.N., Raskovskaya I.L., Rinkevichyus B.S. Surface-profile reconstruction of a liquid droplet based on layer-by-layer laser probing // Technical Physics Letters. 2017. V. 43. № 7. P. 600–602. <https://doi.org/10.1134/s1063785017070124>
4. Chao F.D., Mcquillen J.B., Sankovic J.M., Zhang N. Catastrophe optics method to determine the micro-nano size profiles at TPL of liquid films on a solid surface // Proc. ASME 2009 2nd Micro/Nanoscale Heat and Mass Transfer Internat. Conf. 2009. P. MNHMT2009-18335. <https://doi.org/10.1115/MNHMT2009-18335>
5. Kravtsov Yu.A., Orlov Yu.I. Geometric optics of inhomogeneous media [in Russian]. Moscow: "Nauka" Publ., 1980. 304 p.
6. Yuana Y., Zhang Q., Sheng C., Zhanga Z. Theoretical model of caustics method for the interfacial cracks // Engineering Fracture Mechanics. 2020. V. 233. P. 107006. <https://doi.org/10.1016/j.engfracmech.2020.107006>
7. Qiu P., Yue Z., Yang R., Li J.C. Effects of vertical and horizontal reflected blast stress waves on running cracks by caustics method // Engineering Fracture Mechanics. 2019. V. 212. P. 164–179. <https://doi.org/10.1016/j.engfracmech.2019.03.018>
8. Rinkevichyus B.S., Evtikhieva O.A., Raskovskaya I.L. Laser refractography. N.Y.: Springer, 2010. 186 p. <https://doi.org/10.1007/978-1-4419-7397-9>
9. Vedyashkina A.V., Rinkevichyus B.S., Pavlov I.N. Study of the diffusion layer of a liquid using refraction of structured laser radiation // Collection of Scientific Papers of the VI Internat. Conf. on Photonics and Information Optics. 2017. P. 217–218.
10. Vedyashkina A.V., Raskovskaya I.L., Pavlov I.N. Application of the caustic method to study heat and mass transfer processes in liquids // Collection of Scientific Papers of the X Internat. Conf. on Photonics and Information Optics. 2021. P. 431–432.
11. Vedyashkina A.V., Rinkevichyus B.S., Raskovskaya I.L., Pavlov I.N. Laser radiation caustics method for quantitative diagnostic of transparent inhomogeneous media // Proc. Progress in Electromagnetics Research Symp. 2017. P. 754–758. <https://doi.org/10.1109/PIERS.2017.8261842>
12. Larkin S. Lasers and electro-optics research at the cutting edge. N.Y.: Nova, 2007. 293 p.
13. Zhang N., Chao F.D. Caustics and caustic-diffraction in laser shadowgraphy of a sessile drop and identification of profile near contact line // Opt. and Laser Technol. 2003. V. 35. P. 155–161. [https://doi.org/10.1016/S0030-3992\(02\)00161-5](https://doi.org/10.1016/S0030-3992(02)00161-5)
14. Šikalo Š., Wilhelm H.-D., Roisman I.V., Jakirlić S., Tropea C. Dynamic contact angle of spreading droplets: Experiments and simulations // Physics of Fluids. 2005. V. 17. P. 062103. <https://doi.org/10.1063/1.1928828>

АВТОРЫ

Анастасия Вячеславовна Ведяшкина — научный сотрудник, Особое конструкторское бюро Московского энергетического института, Москва, 111250, Россия; Scopus ID: 55985213700; <https://orcid.org/0000-0002-2670-7712>; an.vedyashkina@gmail.com

Ирина Львовна Расковская — доктор технических наук, доцент, профессор Национального исследовательского университета «МЭИ», Москва, 111250, Россия; Scopus ID: 6506719710; <https://orcid.org/0000-0002-1231-9479>; raskovskail@mail.ru

Илья Николаевич Павлов — кандидат технических наук, доцент, Национальный исследовательский университет «МЭИ», Москва, 111250, Россия; Scopus ID: 36089303100; <http://orcid.org/0000-0002-9014-6294>; inpavlov@bk.ru

Статья поступила в редакцию 13.07.2023

Одобрена после рецензирования 10.10.2023

Принята к печати 24.11.2023

AUTHORS

Anastasia V. Vedyashkina — Researcher, Special Design Bureau of the Moscow Power Engineering Institute, Moscow, 111250, Russia; Scopus ID: 55985213700; <https://orcid.org/0000-0002-2670-7712>; an.vedyashkina@gmail.com

Irina L. Raskovskaya — Dr. Sci. (Engineering), Associate Professor, Professor of National Research University MPEI, Moscow, 111250, Russia; Scopus ID: 6506719710; <https://orcid.org/0000-0002-1231-9479>; raskovskail@mail.ru

Ilya N. Pavlov — PhD (Engineering), Associate Professor, National Research University MPEI, Moscow, 111250, Russia; Scopus ID: 36089303100; <http://orcid.org/0000-0002-9014-6294>; inpavlov@bk.ru

The article was submitted to the editorial office 13.07.2023

Approved after review 10.10.2023

Accepted for publication 24.11.2023