

Василий Владимирович ВОСТРИКОВ¹
Виктор Михайлович ФЛЯГИН²

УДК 532.6

КОМПЬЮТЕРНАЯ ТЕХНОЛОГИЯ ЛАЗЕРНОЙ ДИАГНОСТИКИ ПРОФИЛЯ ПОВЕРХНОСТИ ЖИДКОСТИ

¹ аспирант,
Тюменский государственный университет
vasiliy231@mail.ru

² кандидат физико-математических наук,
старший научный сотрудник, научно-исследовательская
лаборатория фотоники и микрофлюидики,
Тюменский государственный университет
v.m.flyagin@utmn.ru

Аннотация

В данной статье описывается разработка и тестирование компьютеризированной экспериментальной установки для определения профиля поверхности осесимметричных деформаций тонких слоев жидкости, возникающих за счет термокапиллярных течений. Методика определения основана на измерении смещения лазерных лучей, отраженных от поверхности жидкости. По величине смещения определяют угол наклона поверхности в точке падения лазерного луча, а затем пересчитывают изменение локальной толщины слоя жидкости, что в совокупности дает форму его поверхности. Пошаговое перемещение лазерного луча вдоль слоя, обработка кадров, фиксирующих смещение отраженного излучения, и расчет профиля поверхности осуществляется программой, написанной для микрокомпьютера Raspberry Pi 2. Разработанная установка применяется для определения профиля осесимметричного термокапиллярного углубления, индуцированного в слое полидиметилсилоксана резистивным точечным нагревателем.

Цитирование: Востриков В. В. Компьютерная технология лазерной диагностики профиля поверхности жидкости / В. В. Востриков, В. М. Флягин // Вестник Тюменского государственного университета. Физико-математическое моделирование. Нефть, газ, энергетика. 2016. Том 2. № 4. С. 112-121.

DOI: 10.21684/2411-7978-2016-2-4-112-121

Ключевые слова

Термокапиллярная конвекция, профиль термокапиллярного углубления.

DOI: 10.21684/2411-7978-2016-2-4-112-121

Деформация свободной поверхности жидкости под действием термо- и концентрационно-капиллярных течений в тонких слоях жидкости является важным объектом изучения и давно находится под пристальным вниманием исследователей. Дело в том, что, с одной стороны, система с точечным или равномерным линейным нагревателем является простым экспериментом для проверки математических моделей течения жидкости, а с другой стороны, деформированная поверхность жидкости во многих работах используется в качестве искривленного зеркала, и отраженное от нее лазерное излучение интерферирует, формируя на экране картину, которая используется как своеобразный «сигнал» в бесконтактных методах измерения теплофизических и реологических параметров жидкостей и твердых тел [2; 3]. Поэтому экспериментальное получение профиля поверхности является важной задачей для фотомикрофлюидики.

Одним из перспективных методов восстановления профиля осесимметричной деформации свободной поверхности жидкости является предложенный в 2002 г. метод сканирования поверхности жидкости плоским лазерным лучом (лазерным ножом) [5], в последствии незаслуженно забытый: до 2016 г. работа в данном направлении не проводилась. Суть метода состоит в следующем: на тонкий слой жидкости направляют под углом лазерное излучение в виде тонкого плоского листа (в дальнейшем «лазерный нож»; рис. 1). Отражение лазерного ножа от плоской недеформированной поверхности жидкости при проецировании на экран дает прямую линию, а в случае искривленной поверхности на экране формируется изогнутая линия. Максимальное искривление соответствует лучу, отраженному от центрального сечения, проходящего через ось симметрии углубления. По характеру и степени искривления линии судили о деформации поверхности слоя жидкости, причем получали только одну точку профиля в пересечении плоскости центрального сечения деформации поверхности с лазерным ножом (точка А на рис. 1). Для получения всего профиля лазерный нож передвигали параллельным смещением с определенным шагом, последовательно освещая всю деформированную поверхность жидкости. Точность определения профиля поверхности в данном методе зависит от качества исполнения механических и оптических узлов установки, и от качества и размера кадров видеозаписи, поэтому при выполнении указанных условий он может с успехом конкурировать с фотоабсорбционным [1; 4] или интерференционным [6; 7] методами.

В рассматриваемой работе Чаппарова измерение проводилось в три этапа: сначала производили видеозапись изображения лазерного ножа на экране при сканировании, затем обрабатывали видеофайл, по искривлению изображения лазерного ножа определяя углы наклона поверхности жидкости, и уже по зна-

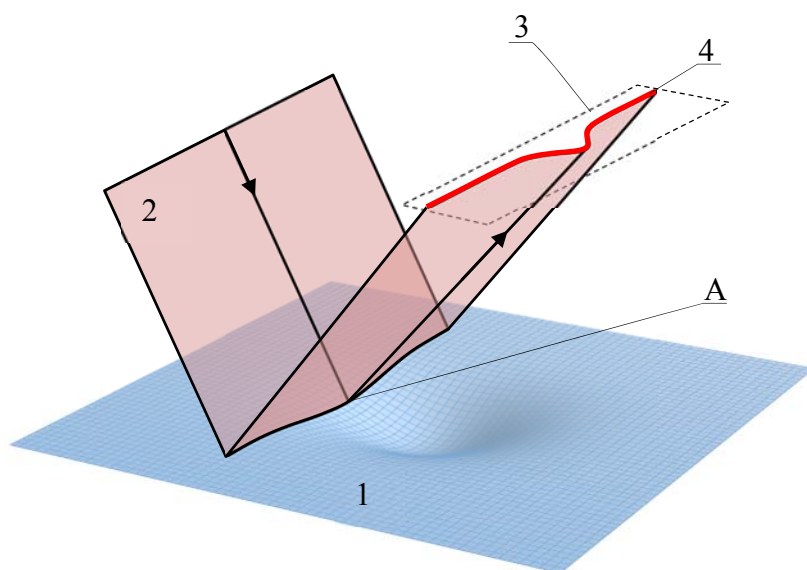


Рис. 1. Отраженный от деформированной поверхности жидкости (1) лазерный нож (2) формирует на экране (3) искривленную линию (4). Стрелками показано направление падения лучей лазерного ножа

Fig. 1. Reflected from deformed liquid surface (1), the laser knife (2) projects onto the screen (3) the curved line (4). The arrows show the direction of the laser beam cutter incidence

чениям углов в каждой точке поверхности восстанавливали профиль. Каждый из этапов требовал выполнения ряда операций со специализированным программным обеспечением, что обуславливало сложность и трудоемкость процесса измерения. Кроме того, видеозапись проводилась на аналоговую видеокамеру с небольшим вертикальным разрешением (380 линий), что обуславливало низкое качество видеокadres, и, как следствие, малую точность определения угла наклона поверхности жидкости.

Представленная работа посвящена разработке автономной автоматизированной установки, конструкция которой устраняет указанные проблемы. Электронная основа установки — микрокомпьютер Raspberry Pi 2, работающий под управлением операционной системы семейства Linux. Расширенные возможности по работе с медиаустройствами позволяют обрабатывать видеозаписи и фотоснимки, получаемые с цифровой видеокамеры микрокомпьютера с максимальным разрешением кадра 3 280 x 2 464 пикселя. Производительности устройства достаточно для обработки кадров большого разрешения, поэтому для управления механизмом сканирования, расчета углов наклона поверхности и определения профиля используется одно программное обеспечение.

Схема установки изображена на рис. 2.

Лазерный нож (4) формируется полупроводниковым лазером с длиной волны 640 нм мощностью 8 мВт с системой линз (3) и падает в кювету с жидкостью (5).

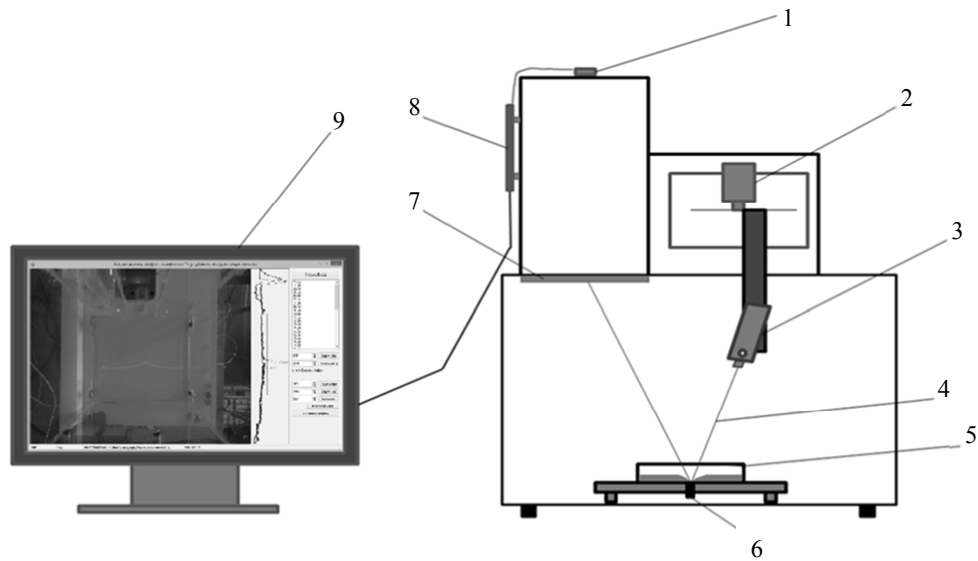


Рис. 2. Схема экспериментальной установки: (1) видеокамера; (2) механизм линейного перемещения; (3) лазер с цилиндрической линзой; (4) лазерный нож; (5) кювета с жидкостью; (6) резистивный нагреватель; (7) экран из матового стекла; (8) микрокомпьютер; (9) консоль оператора

Fig. 2. The experimental setup: (1) the video camera; (2) the linear movement mechanism; (3) the laser with a cylindrical lens; (4) the laser knife; (5) the cuvette of liquid; (6) the resistance heater; (7) the frosted glass screen; (8) the microcomputer; (9) the operator console

Деформация поверхности жидкости происходит за счет термокапиллярных течений, вызываемых резистивным нагревателем (6) с изменяемой мощностью. Отраженное излучение попадает на экран из матового белого стекла (7). Видеокамера (1) сфокусирована на обратной стороне экрана: таким образом исключается попадание в нее прямого или отраженного лазерного излучения. Для сканирования поверхности жидкости предусмотрен линейный двигатель (2), управляемый микрокомпьютером (8). Управление установкой и наблюдение за ходом эксперимента производит оператор с помощью консоли (9).

Определение профиля поверхности жидкости происходит следующим образом. Лазерный нож перемещается линейным двигателем в крайнее положение, в котором он падает на участок заведомо неискаженной поверхности жидкости. Видеокамера захватывает изображение с экрана, после чего программа определяет положение линии лазерного ножа на экране. Затем линейный двигатель смещает лазерный нож на заданное расстояние Δs , видеокамера захватывает изображение с искаженной линией лазерного ножа, и программа по кривизне линии определяет угол наклона поверхности жидкости в текущем положении лазерного ножа. Угол наклона нормали α определяется следующим образом (рис. 3а): программа по кадру определяет расстояние d между положениями

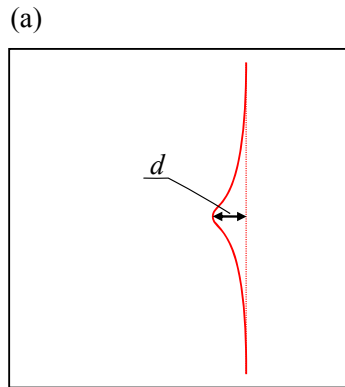


Рис. 3. Определение угла наклона нормали поверхности жидкости

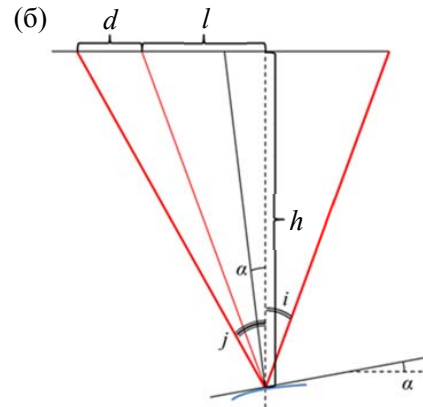


Fig. 3. The liquid surface normal's angle determination

максимального искажения линии и неискаженной линии. Затем по известному значению d , а также известным параметрам установки l, h, i (рис. 3б) определяется угол между отраженным лучом и вертикалью j . Высота h считается неизменной, так как ее значение для недеформированной поверхности жидкости равно 182 мм, а изменение толщины слоя составляет десятые доли миллиметра, что сопоставимо с точностью измерения расстояния. Нормаль к поверхности является биссектрисой угла $(i + j)$ между падающим и отраженным лазерным лучом, поэтому угол наклона поверхности $\alpha = (j - i)/2$.

По известным значениям углов наклона поверхности α и β в двух соседних точках А и В программа рассчитывает интерполяцию участка АВ профиля полиномом 2 степени, рис. 4. Так как первоначальное положение луча соответствует недеформированному слою с нулевым углом наклона, относительно этой точки в дальнейшем рассчитывается локальное изменение толщины слоя жидкости Δh для каждого последующего шага сканирования.

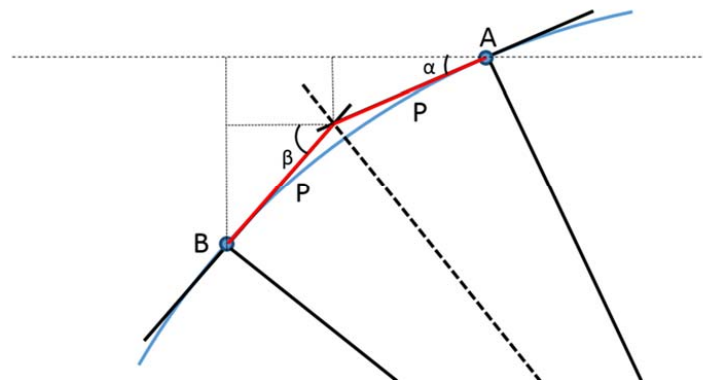


Рис. 4. Восстановление участка профиля по известным значениям углов наклона поверхности на его границах

Fig. 4. A profile site restoration based on the known values of the surface angles at its borders

Таким образом, в процессе сканирования по текущему и предыдущему видеокадрам определяется участок АВ профиля с соответствующим ему значением Δh , после чего программа снова смещает лазерный нож на расстояние Δs для получения следующего участка профиля. В процессе сканирования рассчитывается массив значений Δh , по которым строится профиль поверхности жидкости (рис. 5).

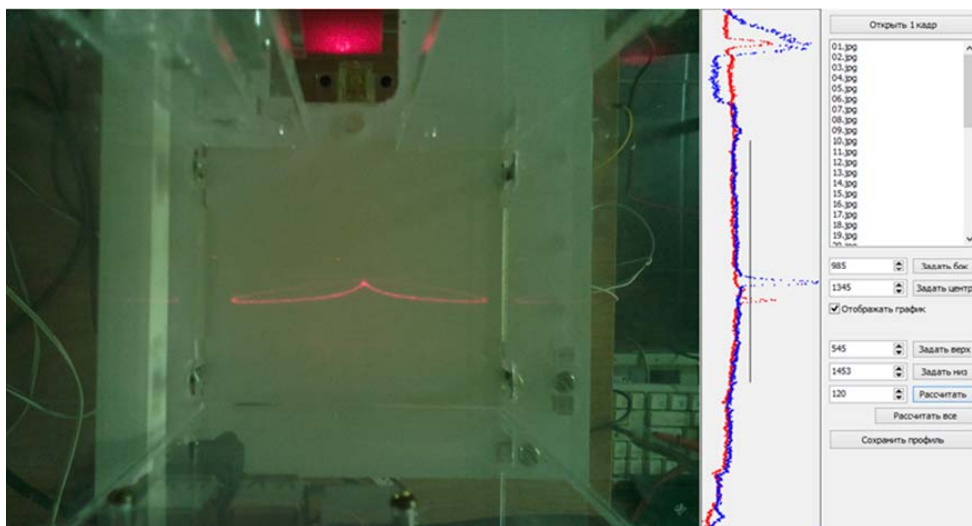


Рис. 5. Интерфейс программы восстановления профиля поверхности жидкости

Fig. 5. The interface of the liquid surface profile's recovery program

Тестовые эксперименты проводились с слоем полидиметилсилоксана ПМС-5 (силиконовое масло с вязкостью 5 сСт). Выбор жидкости обусловлен в первую очередь крайне низкой летучестью (обеспечивающей стабильность стационарного термокапиллярного углубления на протяжении нескольких часов) и низким поверхностным натяжением (19,7 Н/м по данным производителя). Жидкость наливали в пластиковую чашку Петри, толщина слоя жидкости составляла примерно 900 мкм. Конвекция возбуждается резистивным нагревателем (медный стержень 1,2 мм диаметром с намотанным на него манганиновым проводом сопротивлением 25 Ом), вмонтированным в дно чашки Петри, мощность нагревателя изменяется путем регулировки протекающего через него тока. Первый тестовый эксперимент был проведен со значением мощности нагрева 39 мВт. Измерение начинали через 10 минут после включения нагревателя, за это время конвекция стабилизировалась, и углубление переставало меняться в размерах. Восстановленный профиль показан на рис. 6. Для удобства график построен не по локальной толщине слоя жидкости, а по изменению толщины Δh относительно недеформированного горизонтального плоского слоя.

Для проверки известного из литературы [1; 2] факта, заключающегося в увеличении кривизны термокапиллярного углубления с ростом мощности индуктирующего элемента, были сняты профили поверхности с различными мощностями нагрева. Полученные результаты представлены на рис. 7. Дополнительно на рисунке показан профиль недеформированного слоя.

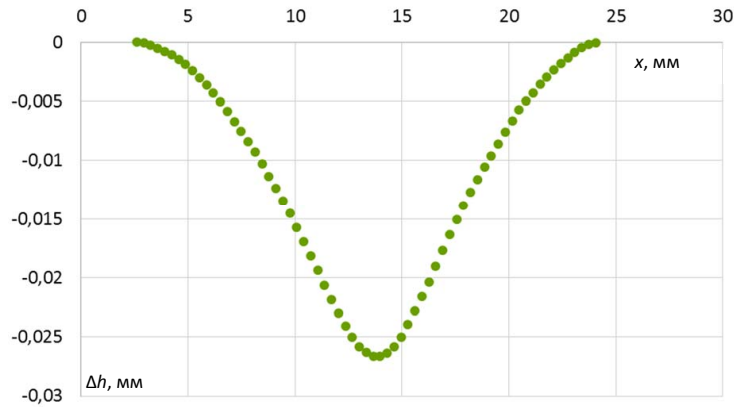


Рис. 6. Восстановленный профиль поверхности слоя силиконового масла ПМС-5 при мощности нагревателя 39 мВт

Fig. 6. The restored profile of the surface layer of the PMS-5 silicone oil with a heater power of 39 mW

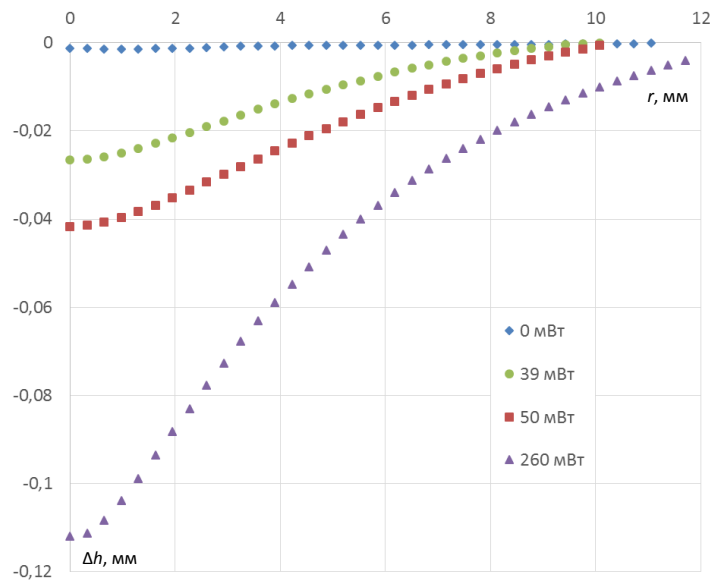


Рис. 7. Восстановленные профили поверхности жидкости для слоя полидиметилсилоксана ПМС-5 толщиной 900 мкм при разных мощностях нагрева. Недеформированный слой соответствует мощности 0 мВт

Fig. 7. The restored profiles of the liquid surface of the SLM-5 polydimethylsiloxane layer 900 microns thick at different heating capacities. The unstrained layer corresponds to 0 mW power

Видно, что с ростом мощности нагрева величина прогиба термокапиллярного углубления в его центре растет, что соответствует указанным выше данным других авторов. Небольшое отклонение профиля поверхности жидкости от горизонтали для случая без нагрева связано, по-видимому, с небольшим отклонением плоскости дна кюветы от горизонтали, вследствие чего локальная толщина слоя жидкости менялась, несмотря на предварительную регулировку горизонтальности столика установки (в работе [2] показана высокая чувствительность эффекта термокапиллярной конвекции к наклону дна кюветы).

Кроме того, нужно отметить, что исследуемая область поверхности не всегда захватывает термокапиллярное углубление полностью, вследствие чего профиль (к примеру, для $P = 260$ мВт) не выходит на горизонтальный уровень на периферии углубления. Решение этой проблемы может быть реализовано либо увеличением области сканирования за счет увеличения длины рельсы, по которой перемещается лазер, либо сканированием только половины профиля, начиная с его центра (от центра нагревателя).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Безуглый Б. А. Капиллярная конвекция, управляемая тепловым действием света и ее применение в способах регистрации информации: дис. канд. физ.-мат. наук / Б. А. Безуглый. М.: МГУ, 1983. 270 с.
2. Безуглый Б. А. Фотоиндуцированные капиллярные эффекты: новые области применения / Б. А. Безуглый, А. А. Федорец, О. А. Тарасов, Н. А. Иванова // Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования. 2004. № 6. С. 80-83.
3. Безуглый Б. А. Четыре открытия одной лаборатории / Б. А. Безуглый, О. А. Тарасов, Н. А. Иванова // Вестник Тюменского государственного университета. 2005. № 3. С. 80-83.
4. Флягин В. М. Применение фотоабсорбции для определения профиля поверхности тонкого слоя поглощающей жидкости, деформированного термокапиллярной конвекцией / В. М. Флягин // Вестник Тюменского государственного университета. Физико-математическое моделирование. Нефть, газ, энергетика. 2015. Том 1. № 1. С. 29-33.
5. Чаппаров Ф. Х. Автоматизированная экспериментальная установка для исследования профиля поверхности жидкого слоя, деформированного конвективными течениями / Ф. Х. Чаппаров // Сборник тезисов ВНКСФ-9. 2003. С. 999-1000.
6. Da Costa G. Interferometric Determination of the Surface Profile of a Liquid Heated by a Laser Beam / G. Da Costa, J. Calatroni // Optics Communications. 1982. Vol. 42. No 1. Pp. 5-9.
7. Helmers H. Holographic Study of Laser-Induced Liquid Surface Deformations / H. Helmers, W. Witte // Optics Communications. 1984. Vol. 49. No 1. Pp. 21-23.

Vasiliy V. VOSTRIKOV¹

Viktor M. FLYAGIN²

**COMPUTER TECHNOLOGY
FOR THE LASER DIAGNOSTIC
OF THE LIQUID SURFACE PROFILE**

¹ Post-Graduate Student, Tyumen State University
vasiliy231@mail.ru

² Cand. Sci. (Phys-Math.), Senior Research Associate,
Research Laboratory of Photonics and Microfluidics,
Tyumen State University
v.m.flyagin@utmn.ru

Abstract

The article describes the development and testing of a computerized experimental setup for determining the surface profile of axisymmetric deformations of thin layers of liquid arising due to thermo-capillary flows. The method for determination is based on measuring the displacement of laser beams reflected from the liquid surface. The magnitude of the offset helps to determine the angle of the surface tilt at the incidence of the laser beam, and then to recalculate the change of the local thickness of the liquid layer, which in total gives the shape of its surface. Consecutive moving the laser beam along the layer, frames processing (which fix the offset of the reflected radiation), and the profile surface calculating is carried out by the program written for the Raspberry Pi 2 microcomputer. The designed setting is used to determine the profile of an axially symmetric thermo-capillary recess induced in a polydimethylsiloxane layer by a point resistive heater.

Keywords

Thermos-capillary convection, profile of thermos-capillary recess.

DOI: 10.21684/2411-7978-2016-2-4-112-121

Citation: Vostrikov V. V., Flyagin V. M. 2016. "Computer Technology for the Laser Diagnostic of the Liquid Surface Profile". Tyumen State University Herald. Physical and Mathematical Modeling. Oil, Gas, Energy, vol. 2, no 4, pp. 112-121.
DOI: 10.21684/2411-7978-2016-2-4-112-121

REFERENCES

1. Bezuglyy B. A., Fedorets A. A., Tarasov O. A., Ivanova N. A. 2004. "Fotoindutsirovannyye kapillyarnyye efekty: novyye oblasti primeneniya" [Photoinduced Capillary Effects: New Fields of Application]. *Poverkhnost'. Rentgenovskie, sinkhrotronnyye i neytronnyye issledovaniya*, no 6, pp. 80-83.
2. Bezuglyy B. A., Tarasov O. A., Ivanova N. A. 2005, "Chetyre otkrytiya odnoy laboratorii" [Four Discoveries of One Laboratory]. *Tyumen State University Herald*, no 3, pp. 80-83.
3. Bezuglyy B. A. 1983. "Kapillyarnaya konvektsiya, upravlyаемaya teplovym deystviem sveta i ee primeneniye v sposobakh registratsii informatsii" [The Capillary Convection, Controlled by the Thermal Effect of Light, and Its Application in the Processes of Information Registration]. *Cand. Sci. (Phys-Math.) dis. Moscow State University*.
4. Chapparov F. Kh. 2003. "Avtomatizirovannaya eksperimental'naya ustanovka dlya issledovaniya profilya poverkhnosti zhidkogo sloya, deformirovannogo konvektivnymi techeniyami" [The Automated Experimental Setup for the Study of the Surface Profile of the Liquid Layer, Deformed by Convective Flows]. *Sbornik tezisov VNKSF-9*, pp. 999-1000.
5. Da Costa G., Calatroni J. 1982. "Interferometric Determination of the Surface Profile of a Liquid Heated by a Laser Beam". *Optics Communications*, vol. 42, no 1, pp. 5-9.
6. Flyagin V. M. 2015. "Primeneniye fotoabsorbtsii dlya opredeleniya profilya poverkhnosti tonkogo sloya pogloshchayushchey zhidkosti, deformirovannogo termokapillyarnoy konvektsiyey" [Photo-Absorption Application for the Determination of the Surface Profile of a Thin Layer of Absorbing Liquid, Deformed by Thermo-Capillary Convection]. *Tyumen State University Herald. Physical and Mathematical Modeling. Oil, Gas, Energy*, vol. 1, no 1, pp. 29-33.
7. Helmers H., Witte W. 1984. "Holographic Study of Laser-Induced Liquid Surface Deformations". *Optics Communications*, vol. 49, no 1, pp. 21-23.