
ІНФОРМАТИКА

УДК 004.031:669.013:532.61

© Левицкая Т.А.*

**ПРИМЕНЕНИЕ ИНФОРМАЦИОННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ
ДЛЯ АВТОМАТИЗАЦИИ РАСЧЕТОВ ТЕРМОДИНАМИЧЕСКИХ
ХАРАКТЕРИСТИК ПОВЕРХНОСТНОГО СЛОЯ**

Разработана экспериментальная установка для исследования поверхностных свойств металлургических расплавов, которая в отличие от известных установок, снабжена оптической системой и ПК, которые позволяют цифровое изображение лежащей капли, получаемое в эксперименте, обрабатывать с помощью быстродействующего программного комплекса, что значительно снижает время проведения эксперимента, позволяет хранить данные и упрощает работу экспериментатора.

Ключевые слова: *поверхностные свойства, физико-химический эксперимент, экспериментальная установка, цифровое изображение, компьютер, сегментация, распознавание, линейная фильтрация, пиксель, уровни интенсивности.*

Левицька Т.О. Застосування інформаційних технологій для автоматизації розрахунків термодинамічних характеристик поверхневого шару. *Розроблено експериментальну установку для дослідження поверхневих властивостей металургійних розплавів, яка на відміну від відомих установок, забезпечена оптичною системою і ПК, які дозволяють цифрове зображення лежачої краплі, одержуване в експерименті, обробляти за допомогою швидкодіючого програмного комплексу, що значно знижує час проведення експерименту, дозволяє зберігати дані і спрощує роботу експериментатора.*

Ключові слова: *поверхневі властивості, фізико-хімічний експеримент, експериментальна установка, цифрове зображення, комп'ютер, сегментация, розпізнавання, лінійна фільтрація, піксель, рівні інтенсивності.*

T.O. Levitskaya. Application of information technology for automation of the calculation of the thermodynamic characteristics of the surface layer. *An experimental setup for studying the surface properties of steel melts, which in contrast to known systems, provided with an optical system and a PC that allow a digital image of drops lying obtained in experiments using fast processing software system that significantly reduces the time of the experiment, to store data and simplifies the work of the experimenter. For image acquisition unit is provided with a drop optical system configured to move in the horizontal and vertical planes. Optical image of the object is formed horizontal optical microscope Stemi SV 11, the use of which is necessary because the resources of the recording device is not possible to obtain a clear image. Next, using a black and white video camera SONY SPT-M308CE, the image is transmitted as an analog signal to image capture board (frame grabber) DATA TRANSLATION (DT-3155). Digitized image with a spatial resolution of 768x576 pixels and 256 gray levels is placed in the memory of a computer company Intel (6) for further processing using specially developed algorithms. Obtaining Profile drop in pixels allows very accurately determine the parameters such as contact angles, surface tension, the drop volume, etc. Since segmentation is a key step to help you find areas related to various objects in the image field, we carried out an analysis of existing methods and found that the most appropriate method for the analysis of*

* канд. техн. наук, доцент, ГВУЗ «Приазовский государственный технический университет», г. Мариуполь, tlevitiisys@gmail.com

digitized images sessile drop is the gradient method. It is based on the fact that at the boundary between two objects of different brightness is a sharp change in intensity, which can easily be fixed by calculating the gray level gradient whose direction is perpendicular to the interface objects.

Keywords: *surface properties, physical-chemical experiment, the experimental setup, the digital image, computer, segmentation, pattern recognition, linear filtering, the pixel intensity levels.*

Постановка проблеми. Необходимым условием развития экспортного потенциала металлургических предприятий Украины является внедрение конкурентоспособных технологий изготовления непрерывнолитой заготовки. Перспективным направлением повышения качества этого производства является подбор рациональных составов шлакообразующих смесей для МНЛЗ. Научный подход к разработке новых составов ШОС на основе отечественных материалов и корректировке применяемых смесей по тем или иным параметрам, должен сопровождаться исследованиями их физико-химических свойств в порошкообразном и расплавленном состояниях. Одним из важнейших свойств, оказывающих значительное влияние на качество непрерывнолитого сляба, являются поверхностные свойства. Получение достоверной информации про них возможно только при использовании комплекса современных методов исследования. Поэтому усовершенствованию методов исследования, изучению физико-химических свойств шлакообразующих смесей и их расплавов уделяется постоянное и значительное внимание. В этом направлении является актуальным усовершенствование методик с применением современных способов обработки информации, возможностей персонального компьютера и методов вычислительной математики. Во время проведения высокотемпературного физико-химического эксперимента исследуемый объект успевает взаимодействовать с конструкционными материалами измерительной ячейки и атмосферой печи. Поэтому необходимо стремиться к сокращению длительности и проводить за это время измерение большего количества свойств, стремясь максимально автоматизировать труд экспериментатора. В последнее время такая задача стала реальной, поскольку появилась регистрирующая цифровая техника и процессоры для её обработки. Высокая точность и быстродействие цифровых фото и видео камер позволяют осуществлять многократное измерение каждой характеристики за время, в которое не происходит изменений исследуемого объекта, что способствует значительному снижению систематической и случайной погрешности. Такой переход к цифровой технике и автоматизации эксперимента сопровождается изменениями методик расчета и подходов к их реализации. Данное направление актуально и перспективно, т.к. малое время записи изображения позволяет исследовать не только статику, но и кинетику изменений. В таких изображениях можно устранять недостатки с помощью арифметических и логических операций и понижать влияние шумов на точность нахождения границы капли.

Анализ последних исследований и публикаций. На основании обзора научно-технической литературы установлено, что метод лежащей капли для исследования поверхностных свойств дает наиболее точные результаты и в настоящее время широко применяется при высокотемпературных исследованиях [1]. В этом методе каплю металла расплавляют на горизонтальной огнеупорной подложке или принудительно формируют над острой кромкой тигля. При температуре формирования капли её фотографируют. Фотографические методы регистрации изображения, которые традиционно используют в практике исследования капиллярных свойств расплавов по форме лежащей капли, не позволяют получать конечные результаты непосредственно в ходе проведения эксперимента. Задачи, которые стоят в этом случае перед экспериментатором - обработка фотоматериалов, ручной обмер фотоснимков и расчет капиллярных характеристик с помощью таблиц являются весьма трудоемкими и продолжительными во времени. Неизбежно, обмеряя снимок, и особенно проводя касательную, исследователь вносит в эту процедуру элементы субъективизма, причем ошибка измерения зависит от качества снимка. Например, вычерчивание максимального диаметра на глаз может дать начальную ошибку в 1,5%. В большинстве случаев, измерения производятся вручную. Хотя некоторые автоматизированные системы с применением телекамер [2-3] и телекамеры на ПЗС-матрице [4] описаны. Разработан ряд алгоритмов расчета [5-9]. По мнению авторов статьи [10] широкого распространения такие системы не получили и в настоящее время необходимы дальнейшие ис-

следования методов, алгоритмов и систем измерения капиллярных свойств. В МИСиС [11] формирование растрового изображения большой капли выполняется с помощью цифровой фотокамеры. Прямое цифровое изображение затем обрабатывается на ПК. В данной работе используется метод Дорсея.

В последнее время все большее внимание при экспериментальном исследовании как поверхностного и межфазного натяжения, так и краевых углов уделяется методам, основанным на анализе оцифрованного изображения зоны двух- и трехфазного контакта. Очевидно, что дальнейшее развитие метода неподвижной капли непосредственно связано с разработкой новых методик и специально разработанных алгоритмов, позволяющих производить автоматический компьютерный расчет поверхностных свойств. К настоящему моменту времени отсутствуют хорошо апробированные, современные, высокоточные, экспериментальные методы измерения поверхностного и межфазного натяжения, поэтому развитие этого направления актуально и перспективно.

Цель статьи – усовершенствование высокотемпературной экспериментальной установки для исследования поверхностных свойств расплавов через оснащение оптической системой и персональным компьютером, что позволяет получить цифровое изображение лежащей капли и обрабатывать его с помощью быстродействующего программного комплекса.

Изложение основного материала. Для проведения экспериментальных исследований поверхностных свойств металлургических расплавов изготовлена из низколегированной стали установка, общая схема которой показана на рисунке [12].

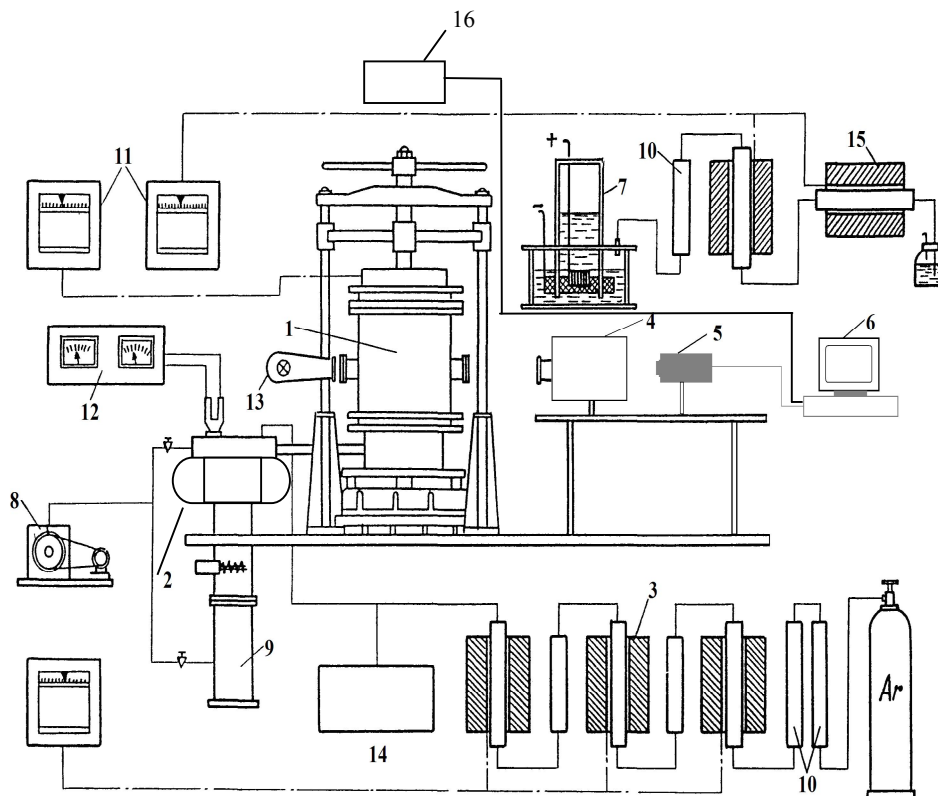


Рисунок – Общая схема установки для определения плотности и поверхностных свойств расплавов: 1 – печь сопротивления; 2 – азотная ловушка; 3, 15 – трубные печи, заполненные магниевой стружкой и титановой губкой; 4 – оптический микроскоп; 5 – видеокамера; 6 – оцифровывающий процессор и персональный компьютер; 7 – электролизер для получения водорода; 8 – форвакуумный насос ВН-2-МГ; 9 – диффузионный насос; 10 – поглотители (с ангидроном и молекулярными ситами CaX и NaX); 11 – потенциометры; 12 – вакуумметр ВИТ-1А; 13 – осветитель; 14 – накопительная емкость для очищенного газа, 16 – оптическая система для фиксирования горизонтальной проекции капли

Для получения изображения капли установка снабжена оптической системой, выполненной с возможностью перемещения в горизонтальной и вертикальной плоскостях. Оптическое изображение исследуемого объекта формируется горизонтальным оптическим микроскопом Stemi SV 11, использование которого необходимо, поскольку ресурсы регистрирующего устройства не позволяют получить четкого изображения. Далее, с помощью черно-белой видеокамеры SONY SPT-M308CE, изображение передается в виде аналогового сигнала на плату захвата изображения (frame grabber) DATA TRANSLATION (DT-3155). Оцифрованное изображение с пространственным разрешением 768x576 пикселей и 256 уровнями серого помещается в память компьютера фирмы Intel (6) для дальнейшей обработки с помощью специально разработанных алгоритмов.

Получение профиля капли в пикселях позволяет очень точно определять такие параметры, как углы смачивания, поверхностное натяжение, объем капли и т.д. Важнейшим этапом анализа оцифрованного поля изображения является сегментация и распознавание границ объекта.

В трудах R. Gonsalesa и R. Vudsa [13] изложены методы обработки цифровой видеоинформации, которые заключаются в следующем: цифровая камера (фотокамера) сама или на базе оптического изображения создает цифровой сигнал и передает компьютеру с записью в пиксельной форме. Каждый пиксель с координатами (x, y) отражает информацию об изображении в виде уровней серого для черно-белых изображений или набора уровней интенсивности трех базисных цветов для цветных. Для метода лежащей капли поле цифрового изображения представляет собой распределение уровней серого, $f(x, y)$, в плоскости изображения, поскольку в исследовании цветных изображений нет необходимости (такое исследование требует больше оперативной памяти и процессорного времени компьютера).

Число пикселей у видеоисточника, градации уровня серого, обеспечиваемые цифровым процессором, и светочувствительность видеоисточника влияют на точность воспроизведения оптического изображения. Первым шагом является запись цифрового поля изображения, затем с ним проводятся различные процедуры, целью которых является облегчение анализа изображения. Далее проводят сегментацию, что позволяет найти области, относящиеся к различным объектам в поле изображения. Этот процесс заканчивается нахождением границ объектов и последующим их распознаванием.

По координатам границ объектов проводят анализ изображения и определяют различные характеристики этих объектов.

В приведенной схеме цифровой обработки изображений для исследования поверхностных явлений типичной является последовательность действий, однако методы, применяемые на различных этапах, могут различаться.

После анализа известных методов сегментации [14-15], целью которого было определить наиболее приемлемый метод для анализа оцифрованного изображения лежащей капли, установлено, что глобальный и локальный методы малопригодны для определения профиля лежащей капли.

Целесообразно применять градиентные методы [16-17], которые основаны на том, что на границе между двумя объектами с различной освещенностью имеет место резкое изменение интенсивности, которое легко фиксируется вычислением градиента уровня серого, направление которого перпендикулярно границе раздела объектов. Величина градиента в пределах объектов с однородным освещением стремится к нулю. Градиентные методы, в отличие от других методов, позволяют выделять все границы в обрабатываемом изображении, независимо от количества имеющихся объектов и освещенности. Для вычисления градиентов применяются различные дифференциальные операторы или маски.

Рассмотрим процесс пространственной фильтрации, который представлен в работах [13, 16]. Данный процесс осуществляется перемещением маски фильтра от одной точки изображения к другой точке, при этом в каждой точке (x, y) вычисляется отклик фильтра с использованием предварительно заданных связей.

Авторы статьи [17] проанализировали некоторые из операторов и установили, что для задачи нахождения координат профиля лежащей капли 3×3 оператор Собеля является наиболее приемлемым. Данный оператор определяет составляющие вектора градиента интенсивности G для пикселя с координатами (x, y) следующими соотношениями:

$$\begin{aligned}
 G_x &\equiv \frac{\partial f(x, y)}{\partial x} = (f(x+1, y+1) + 2f(x+1, y) + f(x+1, y-1)) - \\
 &- (f(x-1, y+1) + 2f(x-1, y) + f(x-1, y-1)), \\
 G_y &\equiv \frac{\partial f(x, y)}{\partial y} = (f(x+1, y-1) + 2f(x, y+1) + f(x-1, y+1)) - \\
 &- (f(x+1, y-1) + 2f(x, y-1) + f(x-1, y-1))
 \end{aligned}
 \tag{1}$$

Преимуществом оператора (1) по сравнению с другими операторами размера 3×3 является эффект сглаживания шума, что актуально для обработки изображений с неоднородно освещенным полем, т.к. процедура численного дифференцирования чувствительна к шуму. Использование масок, которые имели меньшие размеры, 3×1 или 2×2 , привело к сильному снижению точность нахождения градиентов, а применение масок размером 4×4 и больше значительно увеличило время, необходимое для обработки изображения, не давая других заметных преимуществ. Подобные результаты получил автор работы [10].

Детектирование границ капли нами осуществлялось в три этапа, по методу, описанному в работах [13, 16-17, 18]. На первом этапе во всем поле исследуемого изображения применяется оператор (1) для вычисления градиентов по столбцам и по строкам. Пиксели с наибольшим по модулю значением градиента интенсивности выбираются для дальнейшей обработки. На втором этапе в горизонтальном, вертикальном и диагональном направлении сравниваются величины градиентов интенсивности для отобранных на первом этапе пикселей, и выбирается максимальный по значению. В его направлении производится аппроксимация натуральным кубическим сплайном при определенных граничных условиях. Выбирается координата точки пересечения уровня интенсивностей серого (полусумма верхнего и нижнего плато) и аппроксимирующей кривой. На третьем этапе методом наименьших квадратов для каждой из пяти последовательных точек вдоль профиля лежащей капли подбирается полином второго порядка. Пиксели границы капли, которые используются для дальнейшей математической обработки, вычисляются как средняя точка такой полиномиальной кривой.

Выводы

Разработана экспериментальная установка для исследования поверхностных свойств металлургических расплавов, которая в отличие от известных установок, снабжена оптической системой и ПК, которые позволяют цифровое изображение лежащей капли, получаемое в эксперименте, обрабатывать с помощью быстродействующего программного комплекса, что значительно снижает время проведения эксперимента, позволяет хранить данные и упрощает работу экспериментатора.

Список использованных источников:

1. Харлашин П.С. Разработка новых составов шлакообразующих смесей для защиты металла во время непрерывной разливки стали // П.С. Харлашин, Т.А.Левицкая // Вісник Приазов. держ. техн. ун-ту : зб.наук. пр. – Вип. 25 . – Маріуполь. – 2012. – С. 20-26.
2. Измерение капиллярных характеристик расплавов телевизионной системой с ЭВМ / А.Г Амброк, С.А. Грузинцев, Э.Л. Лубе, В.В. Пеллер // Адгезия расплавов и пайка материалов. – 1984. – №12. – С. 12-13.
3. Телевизионная измерительная система на базе ЭВМ для исследования процесса роста по способу Степанова / С.А. Грузинцев, Э.Л. Лубе, А.Г. Амброк, В.В. Пеллер // Изв. АН ОХР. Сер. физ, – 1985. – №12. – С. 2324-2328.
4. Щербаков Л.М.. Об измерении краевых углов смачивания моноволокон / Л.М. Щербаков, Ф.Н. Сухарев // Адгезия расплавов и пайка материалов. – 1984. – №12. – С. 15-17.
5. Liggieri L. An automatic technique for measuring the surface tension of liquid metals / L. Liggieri, A. Passerone // High Temperature Technology. – 1989. – №7. – P. 82-86.
6. Rotenberg Y. Determination of surface tension and contact angle from the shapes of axisymmetric fluid interfaces / Y. Rotenberg, L. Boruvka, A.W. Neumann // J. Colloid and Interface Sci, – 1993. – №1. – P. 169-183.

7. Real time pendant drop tensiometer using image processing with interfacial area and interfacial tension control capabilities / G. Faour, M. Grimaldi, J. Richou, A. Bois // *J. Colloid and Interface Sci.* – 1996. – V. 181. – №1. – P. 385-392.
8. Hond-Kee Lee. Surface tension measurements of liquid iron-nickel-sulphur ternary system using the electromagnetic oscillating droplet technique / Lee Hond-Kee, G. Frohberg Martin, P. Haira Jnan // *ISI International.* – 1993. – Vol. 33. – №8. – P. 833-838.
9. Andrien C. Average spreading parameter on heterogeneous surfaces / C. Andrien, C. Sykes, F. Brochard // *Langmuir.* – 1994. – V. 10. – №7. – P. 2077-2080.
10. Emelyanenko A.M. The role of discretization at the video image processing in sessile and pendant drop methods / A.M. Emelyanenko, L.B. Boinovich // *Colloids and surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects.* – 2001. – V. 189. – P. 197-202.
11. Алгоритм расчета плотности и поверхностного натяжения расплавов методом большой капли при формировании изображения в цифровом формате / Д.Ю. Аникин, М.Р. Филонов, С.В. Иванов, Ю.Б. Лёвин // *Известия ВУЗов. Черная металлургия.* – 2003. – №7. – С. 10-13.
12. А. с. 1744594 СССР, МПК G 01 M 13/02. Установка для определения плотности, поверхностного натяжения и краевого угла смачивания расплавленного материала / П.С. Харлашин. – №4754055; заявл. 31.10.89; опубл. 30.06.92, Бюл. №24. – 5 с.
13. Gonzalez R. Digital Image Processing / R. Gonzalez, R. Woods // *Addison-Wesley Publ.Comp.* – N.Y., 1993. – 1104 p.
14. Hansen F.K. Surface tension by pendant drop / F.K. Hansen, G. Rodsrud // *J.Colloid Interface Sci.* – 1991. – V. 141. – №1. – P. 1-9.
15. Robust digital image analysis of pendant drop shapes / D.B. Thiessen, D.J. Chione, C.B. McCreary, W.B. Kiantz // *J.Colloid Interface Sci.* – 1996. – V. 177. – №2. – P. 658-665.
16. Correlation of line tension and solid-liquid interfacial tension from the measurement of drop size dependence of contact angles / D. Duncan, D. Li, J. Gaydos, A.W. Neumann // *J. Colloid Interface Sci.* – 1995. – V. 169. – №2. – P. 212-217.
17. Li D. Contact angle measurement by axisymmetric drop shape analysis / D. Li, P. Cheng, A.W. Neumann // *Adv. Colloid Interface Sci.* – 1992. – V. 39. – №2. – P. 347-382.
18. Rotenberg Y. Determination of surface tension and contact angle from the shapes of axisymmetric fluid interfaces / Y. Rotenberg, L. Boruvka, A.W. Neumann // *J. Colloid and Interface Sci.* – 1993. – №1. – P. 169-183.

Bibliography:

1. Harlashyn P.S. The development of new formulations of mixtures of slag to protect the metal during the continuous casting of steel // P.S. Harlashyn, A.T. Levytskaya // *Reporter of the Priazovskyi state technical university: collection of scientific works.* – Issue 25. – Mariupol. – 2012. – P. 20-26. (Rus.)
2. Measurement of capillary characteristics of melts television system with a computer / A.G. Ambrok, S.A. Hruzyntsev, E.L. Loubet, V.V. Peller // *Adhezyya rasplavov and soldering materials.* – 1984. – №12. – P. 12-13. (Rus.)
3. TV measurement system based on a computer for study of the growth process in a manner Stepanova / S.A. Hruzyntsev, E.L. Loubet, A.G. Ambrok, V.V. Peller // *Izv. AN OCR. Avg. nat.* – 1985. – №12. – P. 2324-2328. (Rus.)
4. Shcherbakov L.M. On measuring the contact angles of the monofilaments / L.M. Shcherbakov, F.N. Sukharev // *Adhezyya rasplavov and soldering materyalov.* – 1984. – №12. – P. 15-17. (Rus.)
5. Liggieri L. An automatic technique for measuring the surface tension of liquid metals / L. Liggieri, A. Passerone // *High Temperature Technology.* – 1989. – №7. – P. 82-86.
6. Rotenberg Y. Determination of surface tension and contact angle from the shapes of axisymmetric fluid interfaces / Y. Rotenberg, L. Boruvka, A.W. Neumann // *J. Colloid and Interface Sci.* – 1993. – №1. – P. 169-183.
7. Real time pendant drop tensiometer using image processing with interfacial area and interfacial tension control capabilities / G. Faour, M. Grimaldi, J. Richou, A. Bois // *J. Colloid and Interface Sci.* – 1996. – V. 181. – №1. – P. 385-392.
8. Hond-Kee Lee. Surface tension measurements of liquid iron-nickel-sulphur ternary system using the electromagnetic oscillating droplet technique / Lee Hond-Kee, G. Frohberg Martin, P. Haira

- Jnan // *ISIJ International*. – 1993. – Vol. 33. – №8. – P. 833-838.
9. Andrien C. Average spreading parameter on heterogeneous surfaces / C. Andrien, C. Sykes, F. Brochard // *Langmuir*. – 1994. – V. 10. – №7. – P. 2077-2080.
 10. Emelyanenko A.M. The role of discretization at the video image processing in sessile and pendant drop methods / A.M. Emelyanenko, L.B. Boinovich // *Colloids and surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*. – 2001. – V. 189. – P. 197-202.
 11. The algorithm for calculating the density and surface tension of the melt by a large drop in forming an image in digital format / D.Y. Anikin, M.R. Filonov, S.V. Ivanov, J.B. Lovin // *Proceedings of the universities. Chernaya Metallurgy*. – 2003. – №7. – P. 10-13. (Rus.)
 12. Inventor's certificate 1744594 USSR, IPC G 01 M 13/02. Apparatus for determining the density, surface tension and wetting angle of the molten material / P.S. Harlashyn. – №4754055; filed 31.10.89; published 30.06.92, Bull. №24. – 5 p. (Rus.)
 13. Gonzalez R. *Digital Image Processing* / R. Gonzalez, R. Woods // Addison-Wesley Publ.Comp. – N.Y., 1993. – 1104 p.
 14. Hansen F.K. Surface tension by pendant drop / F.K. Hansen, G. Rodsrud // *J. Colloid Interface Sci.* – 1991. – V. 141. – №1. – P. 1-9.
 15. Robust digital image analysis of pendant drop shapes / D.B. Thiessen, D.J. Chione, C.B. McCreary, W.B. Kiantz // *J. Colloid Interface Sci.* – 1996. – V. 177. – №2. – P. 658-665.
 16. Correlation of line tension and solid-liquid interfacial tension from the measurement of drop size dependence of contact angles / D. Duncan, D. Li, J. Gaydos, A.W. Neumann // *J. Colloid Interface Sci.* – 1995. – V. 169. – №2. – P. 212-217.
 17. Li D. Contact angle measurement by axisymmetric drop shape analysis / D. Li, P. Cheng, A.W. Neumann // *Adv. Colloid Interface Sci.* – 1992. – V. 39. – №2. – P. 347-382.
 18. Rotenberg Y. Determination of surface tension and contact angle from the shapes of axisymmetric fluid interfaces / Y. Rotenberg, L. Boruvka, A.W. Neumann // *J. Colloid and Interface Sci.* – 1993. – №1. – P. 169-183.

Рецензент: В.П. Гранкин
д-р техн. наук, проф. ГВУЗ «ПГТУ»

Статья поступила 07.11.2014