

Т.А. Левицкая

ГВУЗ «Приазовский государственный технический университет», Мариуполь

## РАЗРАБОТКА ПРОГРАММНОГО КОМПЛЕКСА ДЛЯ ОБРАБОТКИ ЦИФРОВОГО ИЗОБРАЖЕНИЯ ЛЕЖАЩЕЙ КАПЛИ В ИССЛЕДОВАНИЯХ ПОВЕРХНОСТНЫХ СВОЙСТВ РАСПЛАВОВ

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

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

### Введение

Усовершенствованию методов исследования, изучению физико-химических свойств расплавов уделяется постоянное и значительное внимание. Среди них особо важное значение уделяется методам изучения поверхностных свойств. 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 не-

достатки с помощью арифметических и логических операций и понижать влияние шумов на точность нахождения границы капли.

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. 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 и телекамеры на ПЗС-матрице описаны [1]. Разработан ряд алгоритмов расчета [2]. По мнению авторов статьи [3] широкого распространения такие системы не получили и в настоящее время необходимы дальнейшие исследо-

вания методов, алгоритмов и систем измерения капиллярных свойств. В МИСиС [4] 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** – разработка программного комплекса для автоматизации процесса расчета поверхностных свойств расплавов на высокотемпературной экспериментальной установке, оснащенной оптической системой и персональным компьютером.

## Основная часть

Для проведения экспериментальных исследований поверхностных свойств металлургических расплавов изготовлена установка [5], которая 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 768×576 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.

Детектирование границ капли нами осуществлялось в три этапа, по методу, описанному в рабо-

тах [6]. На первом этапе во всем поле исследуемого изображения применяется оператор (7) 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.

Контур капли определяется уравнением капиллярности Лапласа, которое может быть записано в виде дифференциального уравнения 2-го порядка, но аналитического решения данное дифференциальное уравнение не имеет. Приближенное решение может быть получено с заданной степенью точности. Анализ теоретических аспектов метода лежащей капли показал, что ранее разработанные формулы и таблицы либо трудно применимы, либо не применимы вовсе для расчетов на ПК, что требует преобразований уравнения Лапласа к виду, удобному для машинной математической.

Нами предложены новые методики решения основного уравнения поверхности капли на основе усовершенствованного математического аппарата с реализацией в системе визуального программирования Delphi. Для этого выполнено аналитическое описание численного решения дифференциального уравнения Лапласа эмпирическими формулами с использованием геометрического смысла 1-й и 2-й производной [7]. На основе полученных эмпирических зависимостей получены прототипы контуров капель, что дало возможность перейти к реализации этапа идентификации контуров капель в процессе проведения эксперимента и определения поверхностных свойств расплавов. Это позволило значительно ускорить обработку данных и осуществить полную автоматизацию расчета поверхностного натяжения расплавов с высокой степенью точности (менее 0,5%) по сравнению известными методиками.

Получило дальнейшее развитие решение основного уравнения поверхности капли, которое значительно ускорило обработку по сравнению с из-

вестным методом графического интегрирования, предложенным С.И. Попелем и сотрудниками, расчет в котором производился по графикам вручную. Применение интерполяционной формулы Ньютона для неравноотстоящих значений аргумента позволило разработать и реализовать в системе визуального программирования Delphi алгоритм с полной автоматизацией расчета поверхностного натяжения с высокой степенью точности (менее 0,5 %). В задаче автоматизации метода лежащей капли так же проведена оценка относительной погрешности определения поверхностного натяжения, вызванной эллипсоидностью капли в плане [8]. Составлены таблицы с указанием пределов необходимой точности измерения параметров капли ( $h$  и  $l$ ) для достижения общей относительной погрешности  $\pm 0,5\%$ . Это позволило при полной автоматизации расчетов получать значение поверхностного натяжения расплавов с высокой степенью точностью, относительная погрешность  $\pm 0,5\%$  (раньше 2 – 3%).

## 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 литературы

1. 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.

2. Физико-химические методы исследований металлургических процессов / С.И. Филиппов, П.П. Арсентьев, В.В. Яковлев, М.Г. Крашенинников. – М.: Металлургия, 1986. – 550 с.

3. 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.

4. 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.

5. Левицкая Т.А. Применение информационных технологий для автоматизации расчетов термодинамических характеристик поверхностного слоя / Т.А. Левицкая // *Вісник Приазовського державного технічного університету*. – ПДТУ: Маріуполь, 2014. – №29. – С. 199-205.

6. Gonzalez R. Digital Image Processing / R. Gonzalez, R. Woods // *Addison-Wesley Publ.Comp.* – N.Y., 1993. – 1104 p.

7. Левицкая Т.А. Особенности построения эмпирического описания контура капли в автоматизации расчетов поверхностных свойств расплавов / Т.А. Левицкая, И.В. Федосова // *Наукові праці Донецького національного технічного університету. Металургія: Зб. наук. праць*. – Донецьк: ДонНУ, 2015. – Вип. 1(20). – С. 119-125.

8. Levitskaya T.A. Assessment of the relative error in the automation task by sessile drop method / T.A. Levitskaya // *Вісник Приазовського державного технічного університету: Зб. наук. праць*. – Маріуполь: ДВНЗ «ПДТУ», 2015. – Вип. 30. – С. 250-256.

Поступила в редколлегию 31.08.2015

Рецензент: д-р пед. наук, проф. И.В. Федосова, ГВУЗ «Приазовский государственный технический университет», Мариуполь.

## РОЗРОБКА ПРОГРАМНОГО КОМПЛЕКСУ ДЛЯ ОБРОБКИ ЦИФРОВИХ ЗОБРАЖЕНЬ ЛЕЖАЧОЇ КРАПЛІ У ДОСЛІДЖЕННЯХ ПОВЕРХНЕВИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ РОЗПЛАВІВ

Т.О. Левицька

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 і спрощує роботу експериментатора.

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

## DEVELOPMENT OF PROGRAM COMPLEX DIGITAL IMAGING SESSILE DROP IN THE INVESTIGATION OF SURFACE PROPERTIES OF THE MELT

T.A. Levitskaya

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 and simplifies the work of the experimenter.

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