

УДК 518.8:53

АЛГОРИТМ РАСЧЕТА ФИЗИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ МАЛЫХ КАПЕЛЬ РАСПЛАВОВ И КЕРАМИКИ В ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНЫХ ПОЛЯХ*Лесев В. Н.¹, Созаев В. А.²*

PHYSICAL PARAMETER CALCULATION ALGORITHM FOR SMALL DROPS OF MELTS AND CERAMICS IN HIGH TEMPERATURE FIELDS

Lesev V. N., Sozaev V. A.

This piece of work offers an algorithm for processing of experimental data on small drops of metallic melts and ceramics in high temperature fields, obtained from digitized snapshots. Mathematical grounds for this algorithm have been developed and tested. The results of calculating experiments on determining physical parameters of the system for sessile drops in high-temperature fields using the developed algorithm show that it can be used as a self-sufficient automated unit.

Keywords: algorithm, digitized data processing, small drop, high temperature fields, free surface, wetting angle

Введение

Исследование таких процессов как плавление, пайка, массообмен, конденсация, капиллярная пропитка, флотационное отделение минералов от пустой породы и т. д. базируется на информации о параметрах, характеризующих равновесие в зоне трехфазного контакта системы газ–жидкость–подложка. При изучении подобных структур все большее внимание привлекают проблемы математического моделирования малоразмерных физических объектов, среди которых особый интерес, обусловленный их практической значимостью, вызывают две группы задач.

Основной целью первой является определение поверхностного натяжения (ПН) σ жидких фаз. Для этого разработаны многочисленные статические и динамические методы измерения σ . Наиболее полные обзоры этих методов приводятся в [1, 2]. При оценке ПН жидких металлических расплавов наибольшее распространение получили метод лежащей капли [3, 4] и метод максимального давления в газовом пузыре [5], основанные на первом и втором уравнениях капиллярности,

вытекающих из условия равновесия межфазных границ. В последнее время разрабатываются автоматизированные методы измерения ПН на основе численного интегрирования уравнения Юнга-Лапласа по цифровым данным изображения контура капли. Однако для снижения ошибок в определении ПН необходимо соответствующим образом подбирать размер капли и материал подложки [6].

Существенное влияние на методику определения поверхностного натяжения оказывает и тот факт, что оно может меняться со временем, например, из-за адсорбции. Для таких систем используют методы, позволяющие измерить динамическое поверхностное натяжение и для быстро меняющихся параметров [7].

Задачи второй группы посвящены исследованию краевого угла смачивания θ . При разработке этой проблемы используется целый спектр различных методов [8, 9]. Довольно точные данные θ можно получать, используя метод лежащей капли. В этом методе важно учитывать критическое значение объема V_c жидкости, после достижения которого увеличение высоты капли должно прекра-

¹Лесев Вадим Николаевич, канд. физ.-мат. наук, заведующий кафедрой дифференциальных уравнений Кабардино-Балкарского государственного университета им. Х. М. Бербекова; e-mail: lvn_kbsu@mail.ru

²Созаев Виктор Адыгеевич, доктор физ.-мат. наук, заведующий кафедрой физики Северо-Кавказского горно-металлургического института; e-mail: sozaevv@kbsu.ru

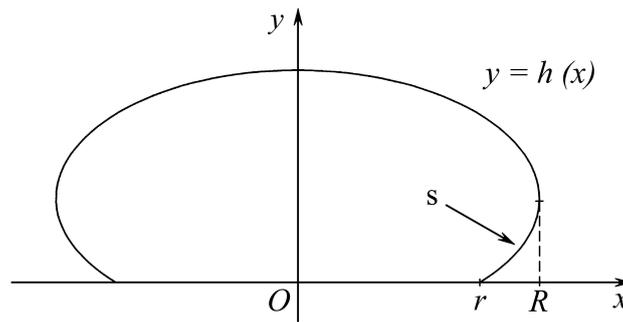


Рис. 1. Радиальное сечение капли

тяться, при объемах $V > V_c$ экстремальная высота капли h_0 остается постоянной. Другой проблемой является изучение с помощью цифровых камер зоны трехфазного контакта при неполном смачивании каплей расплава поверхности подложки. В частности, из-за высокой упругости паров вблизи трехфазного контакта возможны некоторые ошибки в оценке контура капли.

Определение краевого угла смачивания и других параметров по оцифрованным снимкам является наиболее эффективным и часто реализуемым на практике методом, оставляющим в тоже время большое количество нерешенных проблем, связанных с его применением, особенно на этапе анализа оцифрованного поля.

1. Постановка задачи

Будем исследовать малую осесимметричную жидкую каплю, свободно лежащую на твердой горизонтальной подложке в температурном поле (рис. 1).

Назовем s — областью снижения профиля капли или просто областью снижения. При высоких температурах (более 1200°K) сильный тепловой поток создает ореол или вызывает эффект отражения как на подложке и области s капли, так и на участках, близких к апексу [10], что негативно сказывается на классификации граничных точек, определяющих профиль капли при анализе оцифрованных изображений.

Поэтому на стадии обработки снимков основная цель состоит в том, чтобы нивелировать искажения профиля, сформированные тепловыми потоками, и минимизировать погрешность при определении расчетных параметров системы. Этого результата можно добиться, последовательно решив следующие задачи: определение граничных точек объек-

та на основе градиентных методов; установление деформированных участков профиля; интерполяция полученных на предыдущей стадии значений; нахождение координат профиля и искомым физических параметров.

2. Определение граничных точек профиля капли

Основной целью первого этапа реализации предлагаемого алгоритма является определение граничных точек и локализация деформированных участков профиля.

Известно, что процесс формирования капли в ряде случаев сопровождается образованием прекурсорной пленки или просто прекурсора, т. е. пленки, распространяющейся перед движущимся жидким мениском. В частности, для различного рода расплавов растекание на микроскопическом уровне действительно сопровождается вытеканием жидких монослоев впереди линии трехфазного контакта. Поэтому далее рассмотрим два случая, характеризующих зону трехфазного контакта (рис. 2).

Принимая во внимание тот факт, что при определении краевого угла смачивания точки прекурсора не учитываются, редуцируем случай б) к случаю а). Для этого достаточно выполнить параллельный перенос оси абсцисс, совместив её не с уровнем подложки, а с точкой перехода жидкости в прекурсор. Данное преобразование носит обратимый характер и позволяет в случае необходимости объективно вычислять такие параметры, как высота капли в апексе или площадь её радиального сечения.

Таким образом, не нарушая общности рассуждений, остановимся на случае а).

Как известно [11], на границе сред с различной освещенностью имеет место резкое изменение уровней серого тона, что легко

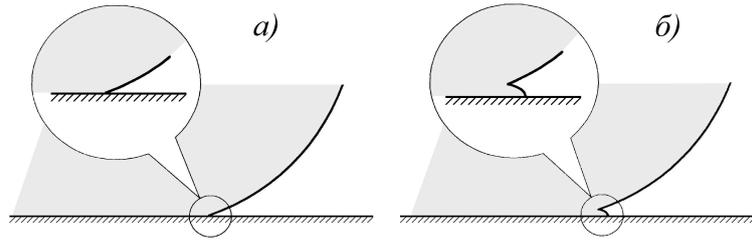


Рис. 2. Зона трехфазного контакта капли частично смачивающей жидкости на горизонтальной подложке: а) без прекурсора; б) с прекурсором

устанавливается путем вычисления соответствующего градиента в направлении нормали раздела сред. Несмотря на то, что на сегодняшний день имеется множество разнообразных градиентных масок, применим 3×3 оператор Собеля

$$G_x = \frac{\partial h(\tilde{x}, \tilde{y})}{\partial \tilde{x}} = h(\tilde{x}_{i+1}, \tilde{y}_{j+1}) + 2h(\tilde{x}_{i+1}, \tilde{y}_j) + h(\tilde{x}_{i+1}, \tilde{y}_{j-1}) - h(\tilde{x}_{i-1}, \tilde{y}_{j+1}) - 2h(\tilde{x}_{i-1}, \tilde{y}_j) - h(\tilde{x}_{i-1}, \tilde{y}_{j-1}), \quad (2.1)$$

$$G_y = \frac{\partial h(\tilde{x}, \tilde{y})}{\partial \tilde{y}} = h(\tilde{x}_{i+1}, \tilde{y}_{j+1}) + 2h(\tilde{x}_i, \tilde{y}_{j+1}) + h(\tilde{x}_{i-1}, \tilde{y}_{j+1}) - h(\tilde{x}_{i+1}, \tilde{y}_{j-1}) - 2h(\tilde{x}_i, \tilde{y}_{j-1}) - h(\tilde{x}_{i-1}, \tilde{y}_{j-1}),$$

где \mathbf{G} — вектор градиента интенсивности для пикселя с координатами (\tilde{x}, \tilde{y}) .

Оператор (2.1) был выбран в связи с тем, что он отличается от операторов 2×2 или 3×1 более высокой точностью, а от операторов 4×4 меньшими временными затратами на реализацию при практически равнозначной погрешности.

Полученное в результате множество точек, образующих границу жидкой фазы исследуемой системы, обозначим через $\{x_i, y_j\}$.

Очевидно, при наличии деформаций в области снижения отображение $x_i \rightarrow y_j$ не будет биективным на этом участке, т. е. найдутся точки, для которых одним и тем же значениям абсциссы x_i будут соответствовать два или более значений ординаты y_j .

Начиная движение по точкам профиля вдоль оси абсцисс от апекса ($x_0 = 0$) до точки $x_N = R$, определим первые пять последовательных точек $h_{i-2}(x_{i-2}; y_{i-2}), h_{i-1}(x_{i-1}; y_{i-1}), \dots,$

$h_{i+2}(x_{i+2}, y_{i+2}), (i = \overline{2, N-2})$ таким образом, чтобы прямые $h_{i-2}h_{i-1}, h_{i-1}h_i, h_ih_{i+1}, h_{i+1}h_{i+2}$ образовывали с положительным направлением оси Ox острые углы $\varphi_{i-2}, \varphi_{i-1}, \varphi_i, \varphi_{i+1}$, отличающиеся между собой не более, чем на градус

$$\varphi_j - \varphi_{j+1} \leq \delta, \quad (2.2)$$

где $j = \overline{i-2, i}$, а $\delta = 1^\circ$ — геометрический параметр, характеризующий гладкость кривой $h(x)$. Аналогичным образом проверяются и точки области снижения.

Заметим, что условие (2.2) при субпиксельном разрешении может оказаться недостаточным, например, при использовании аппаратуры, поддерживающей высокое разрешение (фотокамеры с 17 и более мегапиксельным разрешением), что повлечет уменьшение параметра δ .

Продолжая процесс последовательного построения «касательных» к профилю капли вплоть до точки $x_K = r$ и проверяя для каждой последовательности прямых условие (2.2), установим все абсциссы для оцифрованного изображения, которым соответствуют деформированные участки, предшествующие зоне снижения, а также в зоне s .

После нахождения множества точек, образующих искаженные области границы объекта, можно перейти к интерполяции.

На стадии реализации этого этапа использовалась регрессия общего вида, представляющая собой линейную комбинацию степенных функций $x^m, m = \overline{1, 3}$ и функции равнобочной гиперболы $\frac{1}{x+\alpha}$, где числовой параметр α определялся из условия сходимости регрессии к данным, полученным экспериментальным путем для предшествующих и последующих пяти точек профиля относительно деформированного участка.

Результаты большого количества вычислительных экспериментов позволяют утверждать, что указанный способ аппроксимации

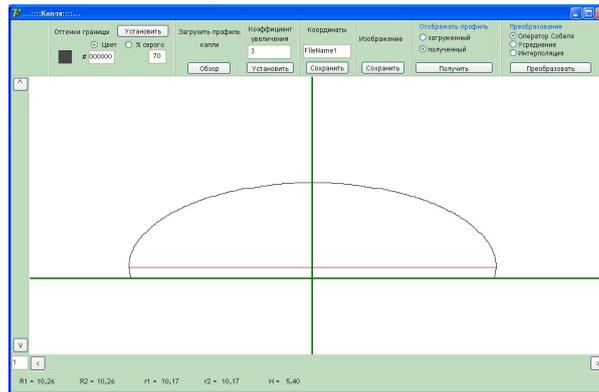


Рис. 3. Результаты первичной обработки одного из апробационных снимков в рабочем окне программного комплекса

дает возможность не только минимизировать погрешности определения физических параметров системы, но и проконтролировать информативность обработки данных.

Помимо указанных выше, алгоритм обладает дополнительными возможностями контроля обработки снимка на каждом этапе. В частности, в программном пакете предусмотрена возможность задания цифровыми средствами оттенков серого, определяющих первичный профиль капли. Данная процедура играет важную роль при обработке снимков с высоким разрешением, поскольку профиль капли, находящейся в температурном поле, не стационарен и, следовательно, граница определяется целым набором точек, близким по тональности.

3. Реализация и апробация алгоритма

Учитывая существенное повышение внимания к высокотемпературному плавлению, значительно расширился диапазон соединений, подвергаемых экспериментам по капиллярному плавлению, что естественно подразумевает универсальность алгоритмов и программных пакетов, применяемых для обработки и анализа результатов подобных опытов. Поэтому процесс апробации строился на оцифрованных изображениях жидких капель металлов, сплавов и керамики при температурах от 1720 до 2850°K. Первый этап обработки одного из снимков представлен на рис. 3.

Алгоритм, математические основы которого описаны выше, был реализован на Delphi.

Расчеты показывают, что предложенный метод позволяет в кратчайшие сроки и с

высокой степенью точности (погрешность не превосходит 0,97%) определять основные параметры системы, полученные данные согласуются с результатами других исследований [12, 13].

Однако когда подложка во время проведения эксперимента имеет отклонение от горизонтали и для отрицательных и положительных значений абсциссы соответствующие ординаты отличаются более, чем на 10^{-5} процента, т. е. имеют место углы оттекания и натекания, а следовательно, капля не является осесимметричной, погрешность начинает возрастать по параболическому закону. Для углов оттекания и натекания, не превосходящих 2° , эта проблема может быть решена усреднением соответствующих координат для различных полуплоскостей. Данная процедура также реализована в алгоритме, что позволяет в указанных условиях обеспечивать расчет параметров системы с погрешностью, не превосходящей 1,5%.

Заключение

Проблема высокоэффективной сегментации в оптически малоcontrastных системах играет важную роль в проведении исследований, посвященных изучению капиллярных профилей, особенно в случаях, когда объект находится в неоднородном по освещенности поле.

Предложенный метод, основанный на построении касательных, существенно отличается от других (например, [14, 15]). Он позволяет минимизировать инструментальную погрешность измерений при уменьшении временных затрат на обработку изображений, а также устанавливать множества гранич-

ных точек, негативно влияющих на точность определения значений расчетных параметров.

Помимо перечисленных преимуществ, разработанный алгоритм может быть использован и при реализации полностью автоматизированных методов определения коэффициентов поверхностного натяжения и вязкости жидкости, а также в других приложениях теории капиллярности, связанных с обработкой изображений со слабо выраженными границами раздела фаз.

Литература

1. *Русанов А. И., Порхаев В. А.* Межфазная тензиометрия. СПб.: Химия, 1994. 400 с.
2. *Шебзухов А. А., Осико Т. П., Кажаскова Ф. М., Мозговой А. Г.* Поверхностное натяжение жидких щелочных металлов и их сплавов // *Обзоры по теплофизическим свойствам веществ.* М.: ОИВТ РАН, 1981. № 5 (31). С. 1–141.
3. *Иващенко Ю. Н., Еременко В. Н.* Основы прецизионного измерения поверхностной энергии расплавов методом лежащей капли. Киев: Наукова думка, 1972. 231 с.
4. *Хатадзе Д. В., Оникашвили Э. Г., Тавадзе Ф. Н.* Некоторые приложения теории капиллярности при физико-химическом исследовании расплавов. Тбилиси: Менниереба, 1971. 114 с.
5. *Пугачевич П. П.* Некоторые вопросы изменения поверхностного натяжения металлических расплавов методом максимального давления в газовом пузыре // *Поверхностные явления в металлургических процессах.* М.: Металлургиздат, 1963. С. 177–192.
6. *Канчуков В. З., Лесев В. Н., Созаев В. А.* Оценка возможных погрешностей при анализе профилей поверхности малых капель металлов // *Известия вузов. Сев.-Кавказ. регион. Естеств. науки.* 2009. № 4. С. 44–48.
7. *Glorieux B., Millot F., Rifflet J. C.* Surface Tension of Liquid Alumina from Contactless Techniques // *Int. Journal of Thermophysics.* 2002. Vol. 23, № 5. P. 1249–1257.
8. *Алчагиров Б. Б., Хожонов Х. Б.* Смачиваемость поверхностей твердых тел расплавами щелочных металлов и сплавов с их участием. Теория и методы исследований // *Теплофизика высоких температур.* 1994. Т. 32, № 4. С. 590–626.
9. *Алчагиров Б. Б., Хожонов Х. Б.* Смачиваемость поверхностей твердых тел расплавами щелочных металлов и сплавов с их участием. Эксперимент // *Теплофизика высоких температур.* 1994. Т. 32, № 5. С. 756–783.
10. *Kudyba A., Sobczak N., Pietrzak K., Klasik F.* Examination of size effect on wetting, interface structure and shear strength of Sn/Cu couples // *HTC Conferences HTC-2009.* P. 151.
11. *Gonzalez R. C., Woods R. E.* Digital Image Processing, 3-rd ed. N. J.: Prentice Hall, 2008. 954 p.
12. *Strzecha K., Koszmidar T.* Drop shape analysis for measurements of surface tension and wetting angle of metals at high temperatures // *International Conference: Perspective Technologies and Methods in MEMS Design,* 2008. P. 57–59.
13. *Seetharaman S.* Fundamentals of metallurgy. Cambridge: Woodhead Publishing Limited and Maney Publishing, 2005. 574 p.
14. *Аникин Д. Ю., Филонов М. Р., Иванов С. В., Левин Ю. Б.* Алгоритм расчета плотности и поверхностного натяжения расплавов методом большой капли при формировании изображения в цифровом формате // *Известия вузов. Черная металлургия.* 2003. № 7. С. 10–13.
15. *Майков И. Л., Директор Л. Б.* Численная модель динамики капли вязкой жидкости // *Вычислительные методы и программирование.* 2009. Т. 10. С. 148–157.

Ключевые слова: алгоритм, обработки оцифрованных данных, малая капля, высокотемпературные поля, свободная поверхность, угол смачивания

Статья поступила 15 марта 2010 г.

Кабардино-Балкарский государственный университет им. Х. М. Бербекова, г. Нальчик

Северо-Кавказский горно-металлургический институт, г. Владикавказ

© Лесев В. Н., Созаев В. А., 2010