

УДК 517.958: 004.042

DOI: 10.15587/1729-4061.2015.47581

Показано, що найбільш ефективним методом згортки багатовимірної вимірювальної інформації до одного числа є використання скінченно-різницевих представлень диференціальних рівнянь в частинних похідних. Розроблені методи таких згорток за допомогою еліптичних рівнянь Лапласа і параболічних рівнянь Фур'є. Наведені приклади використання цих методів в металургійному виробництві з позитивним техніко-економічним ефектом

Ключові слова: метрологічне забезпечення, обробка зображень і відеопотоків, еліптичне і параболічне перетворення

Показано, что наиболее эффективным методом свертки многомерной измерительной информации к одному числу является использование конечно-разностных представлений дифференциальных уравнений в частных производных. Разработаны методы таких свертки с помощью эллиптических уравнений Лапласа и параболических уравнений Фурье. Приведены примеры использования этих методов в металлургическом производстве с положительным технико-экономическим эффектом

Ключевые слова: метрологическое обеспечение, обработка изображений и видеопотоков, эллиптическое и параболическое преобразование

РАЗРАБОТКА МЕТОДОВ ПРЕОБРАЗОВАНИЯ МНОГОМЕРНОЙ ИЗМЕРИТЕЛЬНОЙ ИНФОРМАЦИИ К ЧИСЛУ С ПОМОЩЬЮ ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНЫХ УРАВНЕНИЙ В ЧАСТНЫХ ПРОИЗВОДНЫХ

А. Л. Становский

Доктор технических наук, профессор

Кафедра нефтегазового и химического машиностроения*

E-mail: stanovsky@mail.ru

А. В. Шмараев

Кафедра металлорежущих станков, метрологии и сертификации*

E-mail: schmaraev@gmail.com

И. В. Прокопович

Кандидат технических наук, доцент

Кафедра технологии и управления литейными процессами*

E-mail: igor.prokopovich@gmail.com

Д. А. Пурич

Кандидат технических наук

Кафедра автомобильного транспорта*

E-mail: dpurich@ukr.net

П. С. Швец

Кандидат технических наук

Кафедра электрических машин*

E-mail: pshvets@mail.ru

В. В. Бондаренко

Кафедра радиотехнических систем*

E-mail: snow_dog@ukr.net

*Одесский национальный политехнический университет
пр. Шевченко, 1, г. Одесса, Украина, 65044

1. Введение

Во многих процессах, относящихся к понятию «измерение», первичная информация от объекта измерения поступает в виде изображения, например, цифровой фотографии, или даже видеопотока. Такая информация из-за своего огромного объема (до сотен мегабайт) не может быть встроена в автоматизированные системы управления или проектирования, а используемые при этом экспертные оценки по принципу «посмотрел – решил» отличаются низкой точностью. Единственным приемлемым

здесь методом является преобразование первичной информации к одному числу – результату измерения с помощью дифференциальных уравнений в частных производных второго порядка, которые широко используются в теоретических и прикладных задачах современной науки и техники. Благодаря появившимся в последнее время компьютерным методам численной интерпретации таких уравнений, область их эффективного использования значительно расширилась.

Поэтому актуальными могут быть новые методы преобразования многомерной измерительной инфор-

мации к единому числу с помощью дифференциальных уравнений в частных производных.

2. Анализ литературных данных и постановка проблемы

Цифровое изображение как информационный объект при весьма скромном разрешении каждого из трех цифровых каналов – 150 dpi – и 256 стандартных градаций яркости содержит $150 \times 150 \times 256 \times 3 = 17\,280\,000$ чисел на каждый квадратный дюйм. При более высоком разрешении и нормальной площади изображения счет чисел пойдет уже на миллиарды! Еще более впечатляющий результат получается, если подсчитать таким образом объем информации, содержащейся в видеопотоках [1].

Такие многомерные «результаты измерений» можно использовать в САПР и АСУ единственным образом – методом экспертных оценок. Фактически это выглядит так: эксперт (чаще всего, один человек) смотрит на объект или на его отображение в микроскопе, тепловизоре и т. п. и относит свое впечатление от увиденного к некоторому классу из конечного списка классов, идентификаторы которого используются для последующих расчетов. Например, измерение параметров металлографического шлифа выполняется одним из следующих методов:

- визуальное сравнение видимых под микроскопом зерен с эталонами шкал;

- подсчет количества зерен, приходящихся на единицу поверхности шлифа, с определением среднего диаметра и средней площади зерен;

- подсчет количества пересечений границ зерен отрезками прямых с определением среднего условного диаметра (равновесные зерна) или количества зерен в 1 мм^3 (неравновесные зерна);

- измерение длин хорд под микроскопом или с использованием микрофотографий с определением относительной доли зерен определенного размера [2].

При использовании перечисленных методов погрешность определения величины зерна весьма высока, т. к., в основном, они применимы для однородных структур с равновесными зернами и весьма трудоемки. При применении данных методов к разнотельным и неравновесным структурам ошибка в определении размеров зерна значительно увеличивается.

Наиболее автоматизированным на сегодняшний день является метод, используемый в анализаторе фрагментов микроструктуры твердых тел SIAMS 700, который реализует современные технологии автоматизированного анализа цифровых изображений микроструктуры металлов и сплавов [3].

Недостатки применения анализатора SIAMS 700 заключаются в том, что они не предназначены для оценки изображений с использованием теории пространств с дробной размерностью [4].

Сведение многомерных результатов измерений к одному числу также возможно различными путями, например, с помощью расчета фрактальной размерности массива чисел [4], методов нечеткой математики [5], интеллектуального мониторинга процессов [6, 7], а также методов фрактального сжатия неподвижных

и подвижных изображений [8–10]. Недостаток этих методов – большая временная сложность сжатия.

Первые попытки использовать численные представления дифференциальных уравнений в частных производных для снижения размерности результата измерения появились сравнительно недавно [11]. Этот метод нашел успешное применение для поиска видеопотоков в хранилищах данных [12, 13], а также измерения параметров внутренних тепловых процессов по инфракрасным видеопотокам от поверхности детали [14, 15]. Известно также применение такого подхода к оценке состояния режущего инструмента с помощью компьютерной обработки видеопотока со сходящей стружки [16–18].

Также метод применяется при управлении процессами нагрева твердеющего железобетона внутренними источниками тепла [19, 20] и в качестве экспресс-метода оценки изменений температуры элементов радиоэлектронной аппаратуры [21].

К сожалению, серьезной проблемой таких подходов является отсутствие математического обобщения дифференциальных уравнений в частных производных на конечно-разностные уравнения того же класса, а также методов решения таких уравнений, обращенных не на распределение фазовых переменных при заданных свойствах среды, а, наоборот, – на распределение свойств среды. Например, яркости пикселей изображения при заданных пространственных и временных распределениях фазовых переменных.

3. Цель и задачи исследования

Целью настоящей работы является создание метода преобразования многомерной измерительной информации к единому числу с помощью дифференциальных уравнений в частных производных и их конечно-разностного представления.

Для достижения этой цели в работе были поставлены следующие задачи:

- разработать метод эллиптического преобразования неподвижных отображений от объекта измерения с помощью конечно-разностного представления дифференциального уравнения в частных производных второго порядка Лапласа;

- усовершенствовать метод параболического преобразования подвижных отображений от объекта измерения с помощью конечно-разностного представления дифференциального уравнения в частных производных второго порядка Фурье;

- выполнить производственные испытания метрологического обеспечения технологического процесса непрерывного литья медных слитков, основанного на разработанных методах.

4. Преобразование многомерной измерительной информации с помощью дифференциальных уравнений в частных производных

4.1. Преобразование неподвижных отображений от объекта измерения с помощью эллиптических уравнений

Для свертки в число неподвижных изображений (например, цифровой фотографии) используются

уравнения, не содержащие временного параметра, в частности, уравнение Лапласа – дифференциальное статическое (независящее от времени) эллиптическое уравнение в частных производных, которое в трехмерных декартовых координатах имеет следующий вид [22, 23]:

$$\left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2}\right) = 0, \tag{1}$$

где u – некоторая фазовая переменная, x, y и z – декартовы координаты на плоскости.

Уравнение Лапласа возникает во многих физических задачах механики, теплопроводности, электростатики, гидравлики. В частности, многие двумерные статические задачи теплопроводности описываются выражением [24]:

$$\left(\lambda \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \lambda \frac{\partial^2 T}{\partial y^2}\right) = 0, \tag{2}$$

где фазовая переменная T – температура, λ – коэффициент теплопроводности, x и y – декартовы координаты на плоскости.

Поскольку в теплофизике величина коэффициента теплопроводности λ всегда больше нуля, задача (2) сводится к двумерному варианту задачи (1).

Введем понятие «коэффициент S » и придадим ему такие свойства: он всегда неотрицателен и может принимать только два значения, соответствующих границам яркости: 0 (черный) или 255 (белый). Тогда выражение вида (2) распадается на два уравнения, связанных логическим союзом «или» (очевидный союз «и» опускаем):

$$S = 0 \text{ или } \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2}\right) = 0, \tag{3}$$

что позволяет решать их уже не только относительно u , но и относительно S . Для этого условимся, что $S=255$ в том единственном допустимом условиях (2) случае, когда справедливо второе уравнение из (3). Тогда это решение выглядит так:

$$S = 0 \Big|_{\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \neq 0}; \tag{4}$$

$$S = 255 \Big|_{\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} = 0}. \tag{5}$$

Таким образом, если в результате какого-либо преобразования функции $u(x, y)$ удастся подтвердить или опровергнуть равенство нулю правой части (3), то тем самым будет однозначно определено значение бинарной переменной S .

Пусть (x, y) – координаты точки некоторого плоского изображения, а $u_{xy}(x, y)$ – яркость этой точки. Поскольку минимальная единица изображения пиксель конечного размера, преобразуем непрерывное уравнение (2) в уравнение в конечных разностях [25]:

$$S \left(\frac{\partial^2 u_{xy}}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u_{xy}}{\partial y^2} \right) \Leftrightarrow S \frac{a_{(i+1)j} - 2a_{ij} + a_{(i-1)j}}{\Delta i^2} + S \frac{a_{i(j+1)} - 2a_{ij} + a_{i(j-1)}}{\Delta j^2} = 0, \tag{6}$$

где i, j – дискретные координаты (номера) пикселей вдоль осей x и y , соответственно; a_{ij} – дискретная яркость пикселя с координатами i и j :

$x \Leftrightarrow i, i = 0, 1, 2, \dots, N$ с шагом в 1 пиксель;

$y \Leftrightarrow j, j = 0, 1, 2, \dots, M$ с шагом в 1 пиксель; $\tag{7}$

$u_{xy} \Leftrightarrow a_{ij}, a_{ij} = 0, 1, 2, \dots, 255$ с шагом в 1 градацию яркости.

Согласно принятым в выражениях (7) размерностям, конечные разности $\Delta i = \Delta j = 1$. Поэтому дискретное выражение (6), так же, как и непрерывное выражение (2), в свою очередь, распадается на два выражения, связанных логическим «или»:

$$S = 0 \cup a_{(i+1)j} + a_{(i-1)j} + a_{i(j+1)} + a_{i(j-1)} = 4a_{ij}. \tag{8}$$

Т. е. если правое уравнение в (8) выполняется, то $S=255$, если нет, то $S=0$.

Расчетная схема для эллиптического уравнения в конечных разностях имеет следующий вид (рис. 1).

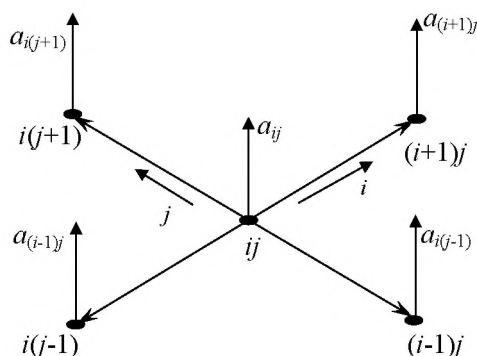


Рис. 1. Расчетная схема для эллиптического уравнения в конечных разностях

Коэффициентов S_{ij} в изображении столько, сколько в нем пикселей. Если считать каждый из них новым (после эллиптического преобразования) значением яркости соответствующего пикселя, получим сеточное поле дискретных (0 – черный; 255 – белый) яркостей S_{ij} размерностью $M \times N$ или, фактически, новое изображение, которое представляет собой *результат эллиптического преобразования (РЭП) начального изображения* (рис. 2):

Схема алгоритма эллиптического преобразования приведена на рис. 3. Из (7) непосредственно вытекает, что, если изображение состоит из пикселей одинаковой яркости, то для всех его пикселей правая часть (7) всегда равна 0, а S всегда равен 255 и РЭП выглядит как белое изображение.

При появлении на изображении участков, отличающихся яркостью от фона, на РЭП, в свою очередь, появляются «черные» ($S=0$) линии границ этих участ-

ков, по суммарной площади которых (а это одно число) можно судить о распространенности последних.

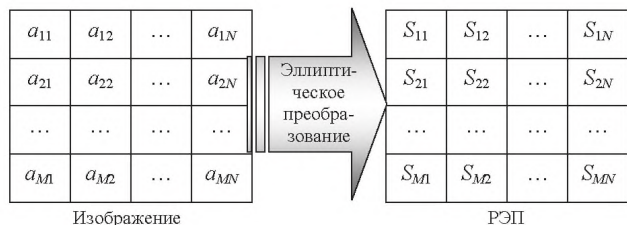


Рис. 2. Результат эллиптического преобразования (РЭП) начального изображения

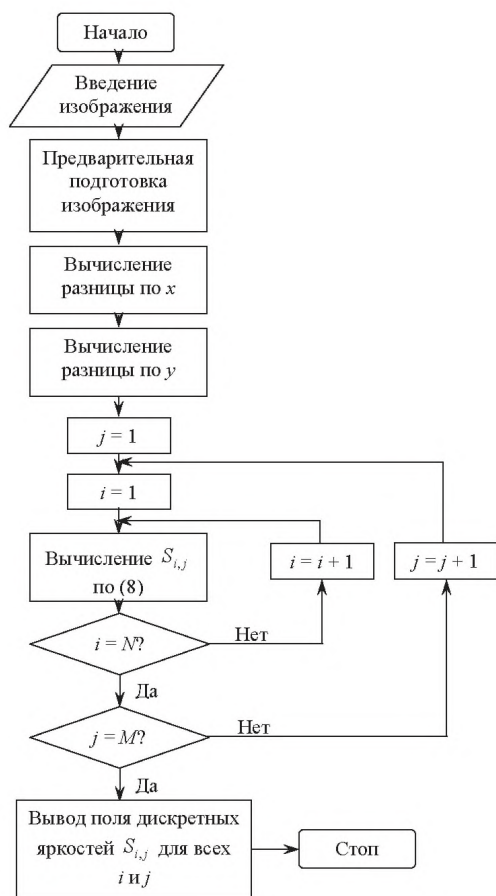


Рис. 3. Схема алгоритма эллиптического преобразования изображения

Таким образом, РЭП может служить мерой разнородности изображения, состоящего из отдельных фрагментов разных размеров.

Предложенный метод был опробован при создании метрологического обеспечения управления технологическим процессом вертикального непрерывного литья. Метод относится к области выявления и определения величины зерна по цифровому изображению микрошлифа, полученного при помощи металлографического микроскопа с последующей оцифровкой.

На рис. 4 представлены результаты такой апробации. Видно, что с увеличением температуры поверхности катанки увеличивается размера зерна непрерывной отливки, а с ним – существенно и в противоположную

сторону изменяются механические свойства готового изделия. Поскольку свойства качественной отливки соответствуют некоторой «золотой середине» (II зоне на рис. 4), управление процессом литья настраивали на достижение температуры поверхности от 40 до 80 °С.

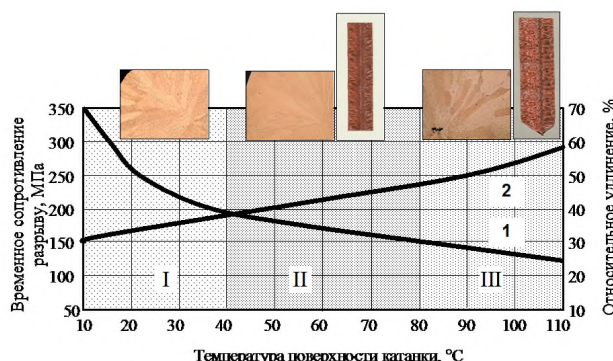


Рис. 4. Влияние температуры поверхности катанки на механические свойства непрерывной медной отливки: 1 – временное сопротивление разрыву; 2 – относительное удлинение

Для реализации такого управления на практике результат эллиптического преобразования изображения микрошлифов металла отливок измеряли предложенными в настоящей работе методами.

В литейном цехе ПуАО «Одесский кабельный завод «Одескабель» (Украина, г. Одесса) были проведены испытания системы метрологического обеспечения в области металлургии литейных процессов при управлении технологическим процессом 16-стренгового литья медной непрерывной отливки из бескислородной катодной меди. Это позволило снизить неравномерность показателей качества медной отливки на 25 %.

4. 2. Преобразование подвижных отображений от объекта измерения (видеопотоков) с помощью параболических уравнений

Для свертки в число подвижных изображений (например, видеопотоков) используются уравнения, содержащие временной параметр, в частности, уравнение теплопроводности Фурье – дифференциальное динамическое (зависящее от времени) параболическое уравнение в частных производных, которое в трехмерных декартовых координатах имеет следующий вид [22, 23]:

$$\frac{\partial T}{\partial \tau} = D \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right), \tag{9}$$

где D – коэффициент температуропроводности, τ – непрерывное время.

По аналогии с эллиптическим преобразованием, перейдем к конечным разностям, дополнительно приняв:

$$\tau \Leftrightarrow k, \tag{10}$$

где $k=0, 1, 2, \dots, K$ с шагом в 1 кадр видеопотока;

$$D \Leftrightarrow D_{ij}, \tag{11}$$

где D_{ij} – коэффициент для каждого ij -го пикселя.

Тогда (9) для видеопотока (двухмерное пространство + время) будет интерпретировано так:

$$\frac{\partial a_{ij}}{\partial \tau} \Leftrightarrow \frac{a_{(k+1)ij} - a_{kij}}{\Delta k}; \tag{12}$$

$$D \left(\frac{\partial^2 a_{ij}}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 a_{ij}}{\partial y^2} \right) \Leftrightarrow D_{ij} \left(\frac{a_{(i+1)jk} - 2a_{ijk} + a_{(i-1)jk}}{\Delta i^2} + \frac{a_{i(j+1)k} - 2a_{ijk} + a_{i(j-1)k}}{\Delta j^2} \right); \tag{13}$$

в результате чего получаются следующие уравнения:

$$D_{ij} = \frac{a_{ij(k+1)} - a_{ijk}}{\Delta k} \left(\frac{a_{(i+1)jk} - 2a_{ijk} + a_{(i-1)jk}}{\Delta i^2} + \frac{a_{i(j+1)k} - 2a_{ijk} + a_{i(j-1)k}}{\Delta j^2} \right). \tag{14}$$

Согласно принятым в выражениях (7) и (10) размерностям, конечные разности $\Delta i = \Delta j = \Delta k = 1$. Поэтому (14) упрощается до выражения:

$$D_{ij} = \frac{a_{ij(k+1)} - a_{ijk}}{a_{(i+1)jk} + a_{(i-1)jk} + a_{i(j+1)k} + a_{i(j-1)k} - 4a_{ijk}}. \tag{15}$$

Расчетная схема для параболического уравнения в конечных разностях имеет следующий вид (рис. 5).

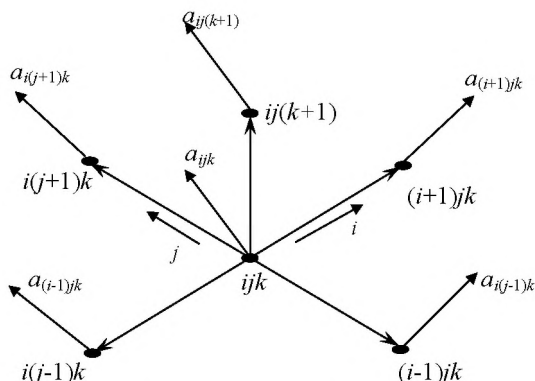


Рис. 5. Расчетная схема для параболического уравнения в конечных разностях

Как и в случае эллиптического преобразования, коэффициентов D_{ij} в изображении столько, сколько в нем пикселей. Если считать каждый из них новым (после параболического преобразования) значением яркости соответствующего пикселя, получим сеточное поле дискретных (0 – черный; 255 – белый) яркостей D_{ij} размерностью $M \times N$ или, фактически, новое изображение, которое представляет собой *результат параболического преобразования (РПП) начального видеопотока* (рис. 6):

Поскольку в числителе (15) стоит временной градиент яркости, все неподвижные пиксели останутся нулевыми («черными»), а попытка применить параболическое преобразование для любых одинаковых изображений (кадров видеопотока) приведет к получению «черного» прямоугольника. В результате

можно считать преобразование (15) средством для выделения контуров [25, 26] *только в подвижной части видеопотока*.

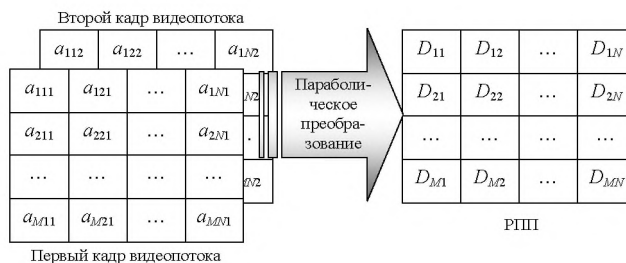


Рис. 6. Результат параболического преобразования (РПП) начального видеопотока

Схема алгоритма параболического преобразования видеопотока приведена на рис. 7.

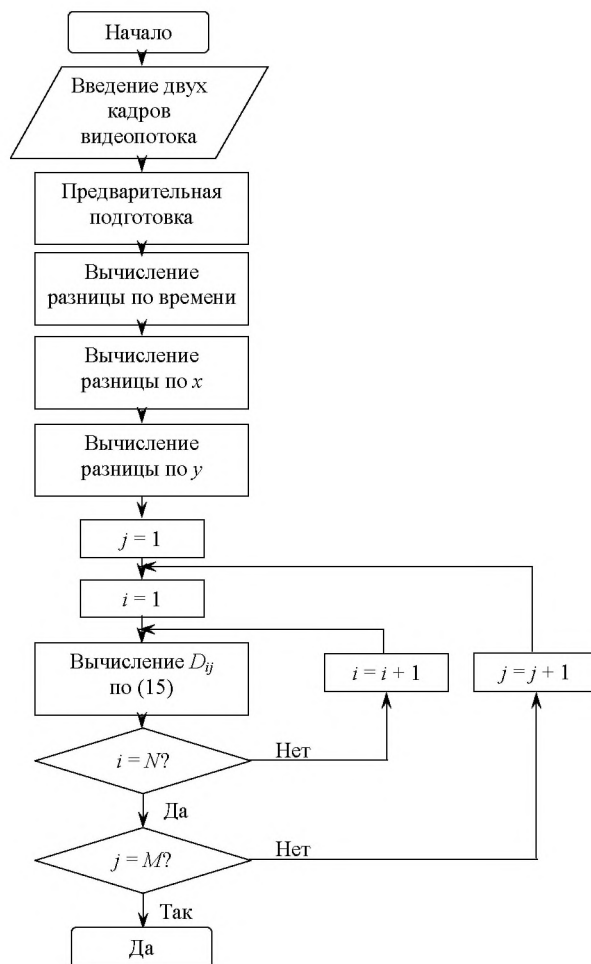


Рис. 7. Схема алгоритма параболического преобразования видеопотока

Предложенный метод был опробован при создании метрологического обеспечения управления технологическим процессом изготовления герметичных чугунных отливок. В настоящее время существует несколько методов определения герметичности [27, 28], в которых результатом измерения являются два параметра: *факт протечки*, который может принимать два зна-

чения – есть/нет, и *масса протечки во времени* или, собственно, герметичность. Основным недостатком прототипа является то, что даже сам факт появления течи в нем определяется визуально. Если же выполняется количественное измерение массы протечки, то о какой точности может идти речь, если в рамках этого метода количество просочившейся жидкости определяется при помощи гидроскопического тампона, который взвешивается до и после протирания контрольной поверхности.

Однако и это не основной недостаток прототипа. Речь идет о третьем выходном параметре метода – времени измерения $\tau_{из}$. В опасных и особо ответственных случаях (просачивание радиоактивных или горючих жидкостей) именно время измерения с помощью прототипа, а оно в нем очевидно высокое, может сыграть роковую роль в управлении системой в целом.

В предлагаемом методе измерения, основанном на параболическом преобразовании видео, снимаемого с поверхности исследуемой детали или образца, все эти недостатки устранены. В нем появление первых признаков течи улавливается не визуально, а цифровым прибором (видеокамерой). Далее сигнал поступает в компьютер на параболическое преобразование, которое, как известно [11], изменяет цвет пикселя изображения с черного на белый, если в месте изображения, соответствующем этому пикселю, за временной интервал Δt произошло малейшее изменение яркости (например, появление просочившейся сквозь металл жидкости).

Наличие РПП предоставляет возможность выполнить его численную оценку, которую в дальнейшем можно использовать для проектирования или управления.

5. Выводы

Разработаны методы преобразования многомерной измерительной информации к единому числу с помощью дифференциальных уравнений в частных производных и их конечно-разностных представлений.

Разработан метод эллиптического преобразования неподвижных отображений от объекта измере-

ния с помощью конечно-разностного представления дифференциального уравнения в частных производных второго порядка Лапласа. В рамках метода для каждого пикселя изображения в соответствии с приведенными в статье расчетной схемой и формулой выполняется *пространственное* преобразование, заключающееся в замене текущего значения яркости пикселя на новое, имеющее две градации яркости – черное и белое. После попиксельного сложения относительное количество черных пикселей превращаются в единственное число – результат эллиптического преобразования.

Усовершенствован метод параболического преобразования подвижных отображений от объекта измерения с помощью конечно-разностного представления дифференциального уравнения в частных производных второго порядка Фурье. В рамках метода для каждого пикселя изображения в соответствии с приведенными в статье расчетной схемой и формулой выполняется *пространственно-временное* преобразование, заключающееся в замене текущего значения яркости пикселя на новое, имеющее две градации яркости – черное и белое. После попиксельного сложения относительное количество черных пикселей превращаются в единственное число – результат параболического преобразования.

В литейном цехе ПуАО «Одесский кабельный завод «Одескабель» были проведены испытания системы метрологического обеспечения в области металлургии литейных процессов при управлении технологическим процессом 16-стренгового литья медной непрерывной отливки из бескислородной катодной меди. Это позволило снизить неравномерность показателей качества медной отливки на 25 %. В цехе мелкого чугунного литья одесского завода «Центролит» были проведены испытания системы метрологического обеспечения качества отливок при управлении технологическим процессом литья в песчаные формы с целью повышения герметичности чугунных отливок для теплообменного оборудования «Труба ребристая». В результате испытаний установлено, что использование этой подсистемы позволило снизить брак отливок по герметичности с 8 до 1,5 %.

Литература

1. Джакония, В. Е. Телевидение [Текст] / В. Е. Джакония. – М.: Горячая линия – Телеком, 2002. – 640 с.
2. ГОСТ 5689-32. Стали и сплавы. Методы выявления и определения величины зерна [Текст]. – М.: Издательство стандартов, 2003. – 35 с.
3. Промышленный программно-аппаратный комплекс анализа изображений SIAMS 700 [Электронный ресурс]. – Режим доступа: \www/URL: <http://www.siams.com/products/siams700/siams700.htm>. – 22.11.2014.
4. Колесникова, Е. В. Фрактальная размерность как мера трансформации серийной проектной деятельности в операционную [Текст] / Е. В. Колесникова, И. И. Становская // Праці Одеського політехнічного університету. – 2013. – Вип. 2 (41). – С. 282–288.
5. Тонконогий, В. М. Принятие решения о выборе способа литья в нечетких условиях литейного производства [Текст]: сб. науч. пр. / В. М. Тонконогий, В. Д. Гогунский, И. И. Становская // Сучасні технології в машинобудуванні. – Харків, НТУ «ХП», 2012. – Вип. 7. – С. 122–129.
6. Прокопович, И. В. Система интеллектуального мониторинга процесса литья [Текст] / И. В. Прокопович, А. А. Коряченко, И. И. Становская // Вісник Одеської державної академії будівництва та архітектури. – 2011. – Вип. 44. – С. 278–282.
7. Гогунский, В. Д. Управление комплексными рисками программы сопровождения систем аварийной защиты объектов ответственного назначения [Текст] / В. Д. Гогунский, Т. В. Бирик, И. И. Становская // Збірник наукових праць Національного університету кораблебудування. – 2012. – № 2. – С. 104–108.

8. Абу Айаш, Т. А. Новый метод фрактального сжатия подвижных изображений [Текст] / Т. А. Абу Айаш, Г. Н. Востров, П. А. Становский // Труды ОНПУ. – 2005. – Спецвыпуск. – С. 98–101.
9. Востров, Г. М. До питання про фрактальне кодування відеопотоків [Текст] / Г. М. Востров, Т. А. Абу Айаш, П. О. Становський // Наукові нотатки. Міжвузівський збірник. – Луцьк, 2005. – Вип. 17. – С. 41–48.
10. Становський, П. О. Розробка методу фрактального кодування-декодування відеопотоків [Текст] / П. О. Становський, Є. В. Малахов, О. О. Арсірій // Труды ОНПУ. – 2007. – Вип. 2 (28). – С. 113–116.
11. Становский, П. А. Параболическое преобразование полноцветного видеопотока от тепловизора [Текст] / П. А. Становский, Л. В. Бовнегра, Ю. В. Шихирева // Праці Одеського національного політехнічного університету. – 2012. – Вип. 2 (39). – С. 67–71.
12. Малахов, Е. В. Кодирование информации для поиска видеопотоков в хранилищах данных [Текст] / Е. В. Малахов, П. А. Становский // Труды ОНПУ. – 2008. – Вип. 2 (30). – С. 156–159.
13. Становский, П. А. Кодирование и поиск подвижных и неподвижных изображений в хранилищах данных [Текст] / П. А. Становский // Електромашинобудування та електрообладнання. Тематичний випуск «Комп'ютерні системи та мережі». – Київ: Техніка, 2009. – Вип. 72. – С. 231–234.
14. Оборский, Г. А. Измерение параметров внутренних тепловых процессов по инфракрасным видеопотокам от поверхности детали [Текст]: зб. наук. пр. / Г. А. Оборский, В. М. Рязанцев, Ю. В. Шихирева // Сучасні технології в машинобудуванні. – Харків, НТУ «ХП», 2013. – Вип. 8. – С. 124–132.
15. Становский, П. А. Автоматизированный мониторинг протекания технологических процессов с помощью низкочастотных видеопотоков [Текст] / П. А. Становский, Л. В. Бовнегра, Ю. В. Шихирева // Збірник наукових праць Кіровоградського національного технічного університету. – 2012. – Вип. 25, Ч. II. – С. 70–74.
16. Тонконогий, В. М. Видеообработка изображений в системе автоматического измерения дефектности износостойких покрытий на режущем инструменте [Текст] / В. М. Тонконогий, П. А. Становский // Труды ОПУ. – 2005. – Вип. 1 (23). – С. 112–115.
17. Бовнегра, Л. В. Оценка состояния режущего инструмента с помощью параболического преобразования видеопотока со сходящей стружки [Текст]: зб. наук. пр. / Л. В. Бовнегра, П. А. Становский, Ю. В. Шихирева // Сучасні технології в машинобудуванні. – Харків, НТУ «ХП», 2012. – Вип. 7. – С. 8–17.
18. Бовнегра, Л. В. Метод оценки износа режущего инструмента с помощью параболического преобразования видеопотока со сходящей стружки [Текст] / Л. В. Бовнегра, Ю. В. Шихирева, Т. И. Носенко // Збірник наукових праць Інституту проблем моделювання в енергетиці ім. Г. С. Пухова. – 2012. – Вип. 65. – С. 60–67.
19. Шихирева, Ю. В. Особенности проектирования и управления процессами нагрева твердеющего железобетона внутренними источниками тепла [Текст] / Ю. В. Шихирева, Г. А. Оборский, О. С. Савельева // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. – 2014. – № 2/5 (68). – С. 20–24. doi:10.15587/1729-4061.2014.23349
20. Становська, Т. П. Инфракрасный метод измерения тепловых параметров затвердевания бетона [Текст] / Т. П. Становська, М. А. Духанина, Ю. В. Шихирева // Холодильна техніка і технологія. – 2013. – № 2 (142). – С. 112–115.
21. Оборский, Г. А. Экспресс-метод оценки изменений температуры элементов РЭА [Текст] / Г. А. Оборский, О. С. Савельева, Ю. В. Шихирева // Технология и конструирование в электронной аппаратуре. – 2014. – № 1. – С. 12–16.
22. Владимиров, В. С. Уравнения математической физики [Текст] / В. С. Владимиров, В. В. Жаринов. – М.: Физматлит, 2004. – 400 с.
23. Шарма, Дж. Н. Уравнения в частных производных для инженеров [Текст] / Дж. Н. Шарма, К. Сингх. – М.: Техносфера, 2002. – 320 с.
24. Пехович, А. И. Расчеты теплового режима твердых тел [Текст] / А. И. Пехович, В. М. Жидких. – Л.: Энергия, 1976. – 352 с.
25. Численное решение параболических уравнений [Электронный ресурс]. – Режим доступа: \www/URL: <http://elib.ispu.ru/library/lessons/mizonov/index.html>. – 21.04.2012.
26. Сойфер, В. А. Компьютерная обработка изображений [Электронный ресурс]. Ч. 2. Методы и алгоритмы, математика / В. А. Сойфер. – Самарский государственный аэрокосмический университет, 1996. – Режим доступа: \www/URL: <http://www.pereplet.ru/obrazovanie/stsoros/68.html>. – 11.06.2010.
27. Смоляков, А. И. Метод контроля надежности литых труб с помощью акустической эмиссии [Текст] / А. И. Смоляков, В. А. Кореняко // Литейное производство. – 1986. – № 2. – С. 35.
28. Смоляков, А. И. Контроль качества чугунных труб [Текст] / А. И. Смоляков, В. И. Семко, В. Г. Полищук // Литейное производство. – 1980. – № 9. – С. 27.