

УДК 004.932.2

## РАСЧЕТ ВЕКТОРНОГО ПОЛЯ СКОРОСТЕЙ ФОРМИРОВАНИЯ МЕТАЛЛИЧЕСКОЙ ПЕНЫ В РАДИОГРАФИЧЕСКИХ ВИДЕОПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТЯХ

А. В. Мяготин

ФГОУ ВПО «Санкт-Петербургский государственный университет гражданской авиации»  
196210, г. Санкт-Петербург, ул. Пилотов, 38  
E-mail: anton.myagotin@gmail.com

Рентгеновская радиография расширена методом цифровой обработки изображений для измерения векторного поля скоростей процесса генерации металлических пен в радиографических видеопоследовательностях. Для решения задачи предложено применение тензорного метода, дополненного интерполяцией адаптивным окном Гаусса. Приведена успешная апробация метода на изображениях, полученных экспериментальным путем.

*Ключевые слова:* радиография, векторное поле скоростей, оптический поток, тензорный метод, металлическая пена.

**Введение.** В физике твердого тела термин «пена» используется для субстанции, содержащей высокую долю пузырьков газа, распределенных в жидком или твердом веществе. Среди пористых материалов, получаемых производственным путем, металлическая пена признана привлекательной для широкого спектра задач благодаря уникальной комбинации физических и механических свойств [1]. Промышленное производство материала, обладающего определенными свойствами, требует корректной установки различных параметров, например таких как давление, температурный режим, влажность. Решение подобной технологической задачи, в свою очередь, требует фундаментальных знаний физических процессов, сопровождающих пенообразование.

Исследования с использованием рентгеновского излучения [2] показали, что проекционная радиография позволяет в режиме реального времени визуализировать формирование металлической пены с момента генерации первичных пор до полного ее разложения. Тем не менее получение количественных характеристик в радиографических видеопоследовательностях ограничивалось либо субъективными оценками наблюдателя, полученными «на глаз», либо вычислением простейших параметров, например скорости верхнего фронта пены [3]. Очевидно, что внедрение цифровых методов анализа видеопоследовательностей предоставит исследователям полную и точную информацию о динамике пенообразования.

В данной работе предлагается метод автоматического анализа серии радиографических изображений, вычисляющий векторное поле скоростей процесса пенообразования. В основу анализа положен тензорный метод [4], дополненный интерполяцией адаптивным окном Гаусса.

Представлены: классическая постановка задачи вычисления поля скоростей в серии изображений (проблема вычисления оптического потока), краткий обзор существующих методов, основные детали тензорного и интерполяционного методов, примерный анализ реальной радиографической видеопоследовательности.

**Описание тензорного метода.** Алгоритм вычисления оптического потока принимает в качестве входа последовательность двумерных изображений и рассчитывает поле скоростей  $\mathbf{u}(x, y, t) = (u_x, u_y)(x, y, t)$ . Последовательность изображений представляется функцией  $f(x, y, t)$ , описывающей яркость в точке  $(x, y)$  и момент времени  $t$ . Используя разложение Тейлора и принимая во внимание  $f(x + dx, y + dy, t + dt) = f(x, y, t)$ , т. е.

вариации яркости можно представить как сдвиг исходного изображения  $f$  на  $(dx, dy)$  за время  $dt$ , формулируется уравнение оптического потока

$$-f_t = \nabla f_{2D} \mathbf{u},$$

где  $\nabla f_{2D} = (f_x, f_y)$  — пространственный градиент;  $f_t$  — производная  $f$  по  $t$ ;  $\mathbf{u}$  — неизвестный вектор скорости [5]. Уравнение потока не имеет уникального решения, необходимо вводить дополнительные ограничения. В литературе представлены различные решения, которые можно разделить на две группы: дифференциальные и методы блочного сравнения [6, 7]. Первые позволяют восстановить векторное поле скоростей с большей точностью. Вторые, как правило, выигрывают в скорости обработки изображений. За основу решения уравнения оптического потока в работе был выбран тензорный метод, относящийся к первой группе [4]. Достоинствами данного метода являются высокая точность результата и небольшие вычислительные затраты.

Рассмотрим ключевую идею тензорного метода. Пусть вектор ориентации  $\mathbf{r} = (r_x, r_y, r_t)$  в точке  $\mathbf{x} = (x, y, t)$  направлен в сторону постоянного значения  $f$ . При  $r_t \neq 0$  можно показать, что  $\mathbf{u} = (r_x/r_t, r_y/r_t)$  [8]. Так как градиент  $\nabla f = (f_x, f_y, f_t)$  направлен в сторону максимального изменения  $f$ , выполняется  $\mathbf{r} \perp \nabla f$ , и поиск  $\mathbf{r}$  можно сформулировать как проблему минимизации:

$$\int_{-\infty}^{\infty} W(\mathbf{x} - \mathbf{x}') (\mathbf{r} \nabla f^T(\mathbf{x}'))^2 d\mathbf{x}' \rightarrow \min, \quad (1)$$

где  $W(\mathbf{x})$  — оконная функция, определяющая веса сглаживания в окрестности точки  $\mathbf{x}$ . Представим (1) в матричной форме:

$$\mathbf{r} \left[ \int_{-\infty}^{\infty} W(\mathbf{x} - \mathbf{x}') \nabla f^T(\mathbf{x}') \nabla f(\mathbf{x}') d\mathbf{x}' \right] \mathbf{r}^T = \mathbf{r} \mathbf{J} \mathbf{r}^T \rightarrow \min, \quad \mathbf{J} = \begin{bmatrix} J_{xx} & J_{xy} & J_{xt} \\ J_{yx} & J_{yy} & J_{yt} \\ J_{tx} & J_{ty} & J_{tt} \end{bmatrix},$$

где  $\mathbf{J}$  — трехмерный структурный тензор, элементы которого вычисляются как

$$J_{pq} = \int_{-\infty}^{\infty} W(\mathbf{x} - \mathbf{x}') f_p(\mathbf{x}') f_q(\mathbf{x}') d\mathbf{x}' \quad \text{для } p, q \in \{x, y, t\}.$$

Пусть  $\mathbf{v}_1, \mathbf{v}_2, \mathbf{v}_3$  — собственные векторы тензора  $\mathbf{J}$  (без потери общности  $\lambda_1 \geq \lambda_2 \geq \lambda_3$ ), тогда в соответствии с [9]  $\mathbf{r}$  коллинеарен  $\mathbf{v}_3$  и расчет оптического потока сводится к определению собственных векторов тензора  $\mathbf{J}$ . В качестве алгоритма нахождения собственных значений и векторов в данной работе использовался численный метод, описанный в [10].

Анализ матрицы  $\mathbf{J}$  показывает, что вектор скорости  $\mathbf{u}$  возможно определить только при  $\text{rank}(\mathbf{J}) = 2$ . Таким образом, в расчетном векторном поле следует ожидать наличия областей, значения скоростей в которых будут неизвестны (рис. 1, а).

Для восстановления полного векторного поля используем методику интерполяции окном Гаусса. Интерполяция описывается следующим выражением:

$$\langle \mathbf{u} \rangle(\mathbf{x}) = \frac{\sum_{\forall \mathbf{x}' \in U: \exists \mathbf{u}(\mathbf{x}')} \mathbf{u}(\mathbf{x}') G_\sigma(\mathbf{x}' - \mathbf{x})}{\sum_{\forall \mathbf{x}' \in U: \exists \mathbf{u}(\mathbf{x}')} G_\sigma(\mathbf{x}' - \mathbf{x})}, \quad (2)$$

где  $G_\sigma$  — трехмерная функция Гаусса, определяющая веса интерполяции;  $U \subset \mathbf{R}^3$  задает размер области интерполяции. Количество и значения весов интерполяции в формуле (2)

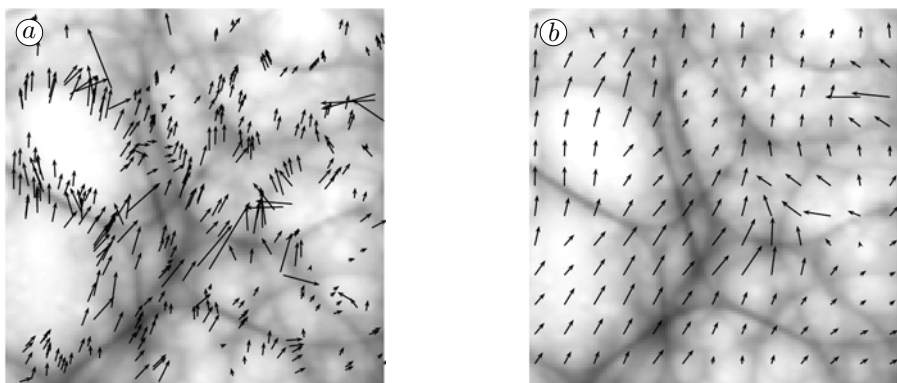


Рис. 1. Расчетное поле векторов скоростей в радиографической видеопоследовательности пенообразования: получено тензорным методом (а) и интерполировано адаптивным окном Гаусса ( $\sigma = 6,0$ ) (b)

непосредственно зависят от исходного поля  $\mathbf{u}(\mathbf{x})$ , поэтому в названии методики, как правило, добавляется характеристика адаптивная. Пример расчетного поля  $\langle \mathbf{u} \rangle$  приведен на рис. 1, b. Несмотря на очевидную простоту, сравнительные исследования показывают, что точность интерполяции адаптивным окном Гаусса сравнима с точностью более сложных методов [11].

**Экспериментальные результаты.** Основными элементами экспериментальной установки для генерации и мониторинга металлических пен являются источник рентгеновского излучения, печь и детектор. Во время нагрева и плавки образца рентгеновские фотоны проходят через материал, преобразуются сцинтилляторным экраном в видимый свет, который детектируется ПЗС-матрицей. Управляющая электроника периодически считывает изображение с матрицы, передает его на компьютер, где оно сохраняется в файл. Более детальная информация о процедуре подготовки образца и параметрах экспериментов приведена в [12].

В качестве демонстрации метода приведем анализ радиографической последовательности на примере двустадийного пенообразования. Изучаемый образец после прохождения температуры плавления быстро расширялся и приобретал пенообразную структуру. Достигнув некоторого объема, пена стабилизировалась на короткое время и затем продолжала расти, но уже с меньшей скоростью. Сила тяжести в данном эксперименте параллельна основному вектору роста, поэтому статистические свойства материала на некотором горизонтальном уровне предполагаются схожими.

В качестве характеристики темпов роста пены принималась средняя вертикальная скорость

$$\bar{u}_y(y, t) = \sum_{x=1}^M u_y(x, y, t) / M,$$

где  $u_y$  — вертикальная компонента вектора  $\mathbf{u}$ , вычисляемая предложенным методом;  $M$  — ширина радиографического изображения, измеренная в пикселях.

Расчетное распределение  $\bar{u}_y(y, t)$  представлено на рис. 2, a. Вертикальный срез на 80-й секунде (рис. 2, b) показывает, что верхние слои пены двигаются с более высокой скоростью ( $\sim 0,17$  мм/с) в сравнении с нижними слоями ( $\sim 0,03$  мм/с). Данный эффект объясняется тем, что верхние слои выталкиваются вверх нижними слоями и при этом расширяются сами. На горизонтальном профиле (рис. 2, c) отчетливо различимы две стадии

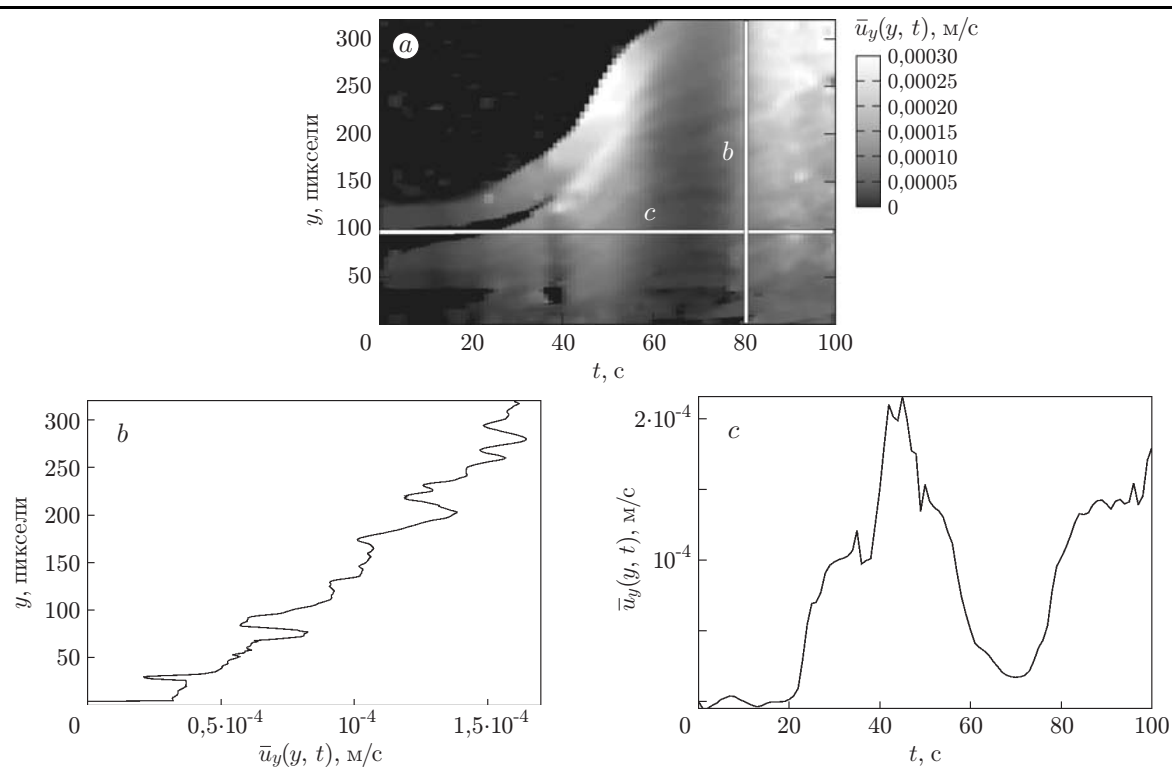


Рис. 2. Распределение средней вертикальной скорости процесса пенообразования: график  $\bar{u}_y(y, t)$  (a), вертикальный (b) и горизонтальный (c) профили

роста пены как пики скорости на 45 и 90 с. Возникновение двустадийного роста металлической пены объясняется результатами исследования, полученными в [13].

**Заключение.** Для расчета векторного поля скоростей в проекционных радиографических изображениях в предлагаемой работе был реализован и апробирован тензорный метод, дополненный интерполяцией адаптивным окном Гаусса. Приведенный метод базируется на вычислениях собственных значений и векторов структурного тензора. Метод применялся для анализа радиографических последовательностей процесса формирования металлической пены. Измеренные характеристики адекватно отражают сложную динамику процесса пенообразования, позволяют автоматизировать обработку видеопоследовательностей, предоставляют возможность ранее недоступного количественного анализа радиографических изображений, ведущего к новым заключениям о наблюдаемых физических процессах.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Banhart J.** Manufacture, characterization and application of cellular metals and metal foams // Prog. Mater. Sci. 2001. **46**, N 6. P. 559–632.
2. **Banhart J., Stanzick H., Helfen L., Baumbach T.** Metal foam evolution studied by synchrotron radiography // Appl. Phys. Lett. 2001. **78**. P. 1152.
3. **Wübben T., Stanzick H., Banhart J., Odenbach S.** Stability of metallic foams studied under microgravity // Journ. Phys.: Condensed Matter. 2003. **15**. P. 427–433.
4. **Haußecker H., Jähne B.** A tensor approach for precise computation of dense displacement vector fields // Mustererkennung 19 DAGM-Symposium. Springer-Verlag, 1997. P. 199–208.
5. **Horn B., Schunck B.** Determining optical flow // Artif. Intelligence. 1981. **17**, N 1–3. P. 185.

6. **Beauchemin S., Barron J.** The computation of optical flow // ACM Comput. Surv. 1995. **27**, N 3. P. 433.
7. **Bruhn A., Weickert J., Feddern C. et al.** Real-time optic flow computation with variational methods // Comput. Analys. of Images and Patterns. 2003. **2756**. P. 222.
8. **Jähne B.** Digital Image Processing. N. Y.: Springer-Verlag, 2002.
9. **Pao C. P.** Линейные статистические методы и их применение. М.: Наука, 1968.
10. **Press W. H., Flannery B. P., Teukolsky S. A., Vetterling W. T.** Numerical Recipes: The Art of Scientific Computing. Cambridge: Cambridge University Press, 1992.
11. **Vedula P., Adrian R. J.** Optimal solenoidal interpolation of turbulent vectors: Application to PTV and super-resolution PIV // Exp. Fluids. 2005. **39**, N 2. P. 213–221.
12. **Myagotin A., Helfen L., Banhart J., Baumbach T.** In situ radiography of metal foaming processes: a quantitative analysis // 3rd Workshop NDT in progress. Prague: Brno University of Technology, 2005. P. 223–233.
13. **Matijasevic B., Fiechter S., Zizak I. et al.** Decomposition behavior of as-received and oxidized TiH<sub>2</sub> powder // PM. Vienna: Powder Metallurgy Association, 2004. Vol. 4. P. 149–155.

*Поступила в редакцию 11 декабря 2008 г.*

---