ФУНКЦИОНАЛЬНЫЙ МЕТОД ТРАССИРОВКИ ГРАНИЦ РАЗДЕЛА ДВУХ СРЕД, ИМЕЮЩИХ ЦИЛИНДРИЧЕСКУЮ ГЕОМЕТРИЮ

Аринин В.А.

Институт физики взрыва Российского Федерального ядерного центра ВНИИ экспериментальной физики (ИФВ РФЯЦ-ВНИИЭФ)

Введение. Для исследования свойств материалов в области давлений мегабарного диапазона и для уменьшения эффектов необратимого нагрева используется техника квазиизэнтропического нагружения в экспериментальных устройствах цилиндрической геометрии [1, 2], использующих энергию взрывчатых веществ. Наиболее распространенным методом обработки получаемых в этих опытах рентгеноснимков были экспертные оценки. Но, из-за неизбежного субъективизма, получаемые результаты не считались слишком надежными. Применение в качестве альтернативы градиентного метода не обеспечивает приемлемую точность из-за трудноконтролируемых регулярных ошибок [3]. Природа цилиндрической геометрии позволяет существенно улучшить статистику изображения за счет суммирования строк, перпендикулярных оси симметрии экспериментального устройства, что делает эффективным применение метода функциональной трассировки. Для его реализации в цилиндрическом случае были решены следующие смежные задачи.

- Определение направления оси симметрии с целью правильной ориентации изображения.
- Определение положения оси симметрии для измерения асимметрии в работе устройства.
- Контекстное устранение неравномерности экспозиции изображения с целью минимизации ошибок функциональной трассировки.

Проверка предлагаемого метода трассировки цилиндрических границ на статических рентгеноснимках показала его исключительную точность.

Исходные данные. Типичные рентгеноснимки работы устройств цилиндрической геометрии приведены на рисунке 1: а) — снимок хорошего контраста с протяженными участками цилиндрических границ и ярко выраженными границами разделов; б) — снимок низкого контраста с плохо проработанными границами разделов, участки цилиндрических границ — протяженные; в) — снимок с неопределенными границами (внутренняя), границами малого контраста (легкая вставка на внешней границе внутреннего цилиндра), с короткими участками цилиндрических границ.

Сущность метода. Предлагаемый метод основан на следующей гипотезе о функциональных особенностях протяженных цилиндрических границ на рентгеноснимках.

- Из-за экспоненциальной природы поглощения рентгеновского излучения, логарифм интенсивности прошедшего излучения D=ln(I) при отсутствии искажающих факторов пропорционален просвечиваемой толщине материала, следовательно, слева и справа от изображения цилиндрической границы функция D должна хорошо аппроксимироваться эллипсом.
- Искажения передаточной характеристики и взаимное влияние границ друг на друга в коаксиальной геометрии несущественно исказят приграничную функцию.
- Функция, находящаяся ближе к оси, при пересечении на границе с функцией, находящейся с другой стороны границы, в точке пересечения должна иметь бесконечную производную. Точка пересечения является искомой координатой границы.
 - Размытие изображения компенсируется экстраполяцией данных в окрестность границы.
 - Наличие шумов на изображении не вызывает систематической ошибки.

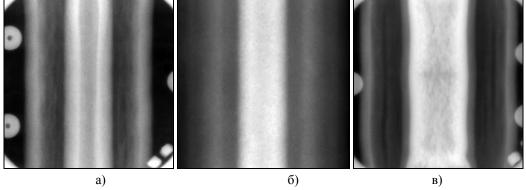


Рис. 1 – Примеры рентгеноснимков работы устройств цилиндрической геометрии

Проверка гипотезы на многочисленных математических моделях и на статических рентгеноснимках показала ее применимость.

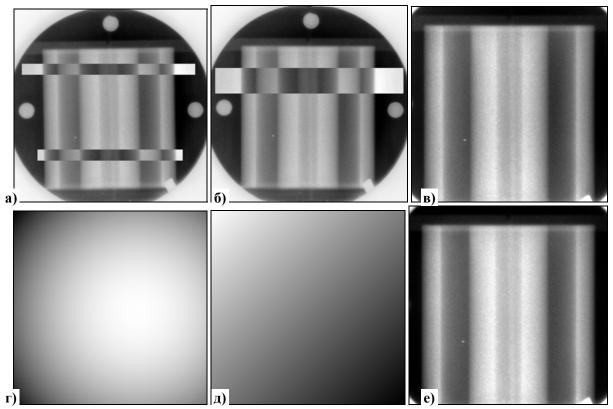


Рис. 2 – Подготовка изображений к трассировке границ

Подготовка изображений: ориентация оси симметрии. В общем случае при проведении рентгеносъемки ось симметрии устройства образует с вертикалью некоторый угол. Это не позволяет напрямую суммировать строки изображения с целью получения качественного функционального профиля. Для определения угла наклона оси воспользуемся корреляционным подобием относительно нее рентгеновского изображения цилиндра. Выберем две полосы из верхней и нижней частей изображения, причем базовая полоса (допустим, верхняя) должна быть длиннее коррелируемой. Для каждой полосы просуммируем столбцы с целью получения одномерных дискретных функций. Пусть длина базовой функции M элементов, а коррелируемой – N элементов, причем M > N. Тогда, делая выборки из базовой функции длиной N слева направо с шагом в один дискрет можно получить M - N + 1 коэффициентов корреляции, используя соотношение (1), где a_i — приведенный элемент базовой выборки длины N (после вычитания из него среднего арифметического выборки), b_i — приведенный элемент коррелируемой функции.

$$\boldsymbol{k}_{\text{kopp}} = \sum_{i=1}^{N} \boldsymbol{a}_{i} \boldsymbol{b}_{i} / \sqrt{\sum_{i=1}^{N} \boldsymbol{a}_{i}^{2} \cdot \sum_{i=1}^{N} \boldsymbol{b}_{i}^{2}}$$
 (1)

Для субпиксельного определения положения максимума функции сдвиговой корреляции применим квадратичную интерполяцию. Пусть максимум находится в точке с координатой i, тогда уточненное положение максимума – i+ Δi , где Δi определяется следующим соотношением:

$$\Delta \pmb{i} = \frac{1}{2} \cdot \frac{\pmb{k}_{i-1} - \pmb{k}_{i+1}}{\pmb{k}_{i+1} - 2\pmb{k}_i + \pmb{k}_{i-1}}$$
. Положение максимума функции корреляции определяет сдвиг нижней поло-

сы относительно верхней, что, с учетом расстояния между полосами, позволяет найти угол поворота. На рисунке 2a полосы, выбранные для корреляции, показаны негативом. Определенный по ним угол поворота, ориентирующего ось симметрии вертикально, составил $-1,087^{\circ}$. Результат поворота показан на рисунке 26.

Подготовка изображений: определение положения оси симметрии снимка. Эта операция необязательна, но весьма полезна, так как позволяет определить степень асимметрии границ. Исходя из этого, по взрывным снимкам можно оценить качество срабатывания экспериментального устройства, а по статическим — точность метода. Для определения положения оси симметрии также применим корреляционный метод. Максимум сдвиговой корреляции между базовой полосой и ее участком, отраженным относительно вертикали, определяет наиболее вероятное местоположение оси. На рисунке 2б выбранная полоса показана негативом. Изображение в) представляет собой фрагмент изображения б), вырезанный так, чтобы ось симметрии проходила точно по его середине (см. рисунок 2).

Подготовка изображений: выравнивание поля экспозиции. Данная операция обеспечивает равные веса суммируемых строк при получении функционального профиля. Ее влияние на точность трассировки границ в большинстве случаев ничтожно, тем не менее, ее следует выполнять, да и восприятие снимков с выровненным полем существенно лучше. Выравнивание поля производится с помощью мультипликативного маскирования, то есть, для устранения неравномерности экспозиции изображение поэлементно умножается на маску. Используется два типа масок: сферическая и плоская (если смотреть на трехмерное представление изображения маски). Контроль производится по гистограмме фона: чем уже гистограмма, тем лучше выравнивание. При подборе масок варьируется шесть параметров, поэтому процесс маскирования является в некотором роде искусством. Его автоматизация сложна и требует больших вычислительных ресурсов. На рисунке 2г,д приведены сферическая и линейная маски, использовавшиеся при коррекции неравномерности поля экспозиции снимка, представленного на рисунке 2в. Диапазон значений сферической маски составил 0,801÷1, линейной – 0,962÷1.

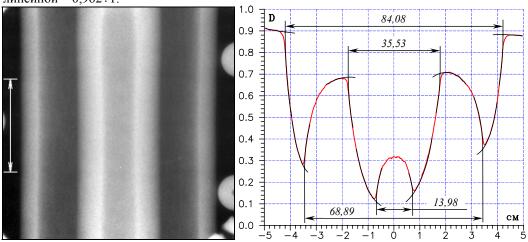


Рис. 3 - Трассировка границ в устройствах цилиндрической геометрии

Трассировка. На рисунке 3 приведен результат трассировки опыта с цилиндрической геометрией, границы имеют большую протяженность. Приведенный снимок соответствует области $99,34 \times 99,34$ мм и представлен дискретным изображением размером 1000×1000 пикселей. Функциональный профиль получен по 400 строкам: с 311-й по 710-ю (показаны белой стрелкой).

Погрешность метода. Контекстная оценка точности состоит в сравнении результата обработки по выбранному участку с обработкой по одинаковым выборкам, покрывающим весь участок. Представительная оценка может быть получена по 7÷10 выборкам, для устранения влияния возможного дрейфа радиусов по вертикали на искомую погрешность, выборки следует делать черезстрочно. Пусть, например, необходимо обработать n=8 выборок, тогда в первую войдут строки участка с номерами $1, 9, \dots 8n+1$, во вторую – $2, 10, \dots 8n + 2$ и так далее. Пусть среднеквадратичное отклонение границ, найденных по выборкам от значения, найденного по всему участку, равно σ_{pt} , тогда искомое значение среднеквадратичного отклонения результата $\sigma = \sigma_{nt} \sqrt{2/n}$. Отметим, что усреднение результатов обработки по выборкам не совпадает с результатом обработки всего участка (ошибки не эргодичны). Оценка точности по модели состоит в проведении многократной рентгеносъемки теста, близкого по характеристикам к состоянию экспериментального устройства на момент регистрации и при тех же условиях съемки. Полученное значение σ_{rs} определяет функцию нормального распределения ошибок в статическом эксперименте. Эта функция должна быть свернута с функцией зависимости интенсивности излучения рентгеновской установки от времени с учетом скорости движения границы, что и определит рабочее значение σ (в процессе проведения рентгенографических экспериментов зависимость интенсивности излучения от времени всегда фиксируется). Увеличение погрешности из-за динамической нерезкости связано с необходимостью экстраполяции приграничных функций на бо́льшее расстояние по оси ординат. В таблице приведены значения σ , полученные контекстной оценкой по 8-ми выборкам.

Таблица – Результаты обработки опыта по квазиизэнтропическому нагружению дейтерия

Код	R_1			R_2			R_3			R_4		
	R, мм	σ , мм	σ, %	R, мм	σ , мм	σ , %	R, мм	σ , мм	σ, %	R, мм	σ , мм	σ , %
13/2	6,99	0,12	1,72	17,77	0,09	0,51	34,45	0,12	0,35	42,04	0,10	0,24

Заключение. Предложенный функциональный метод определения местоположения границ раздела двух сред в экспериментальных устройствах цилиндрической геометрии по их рентгеноснимкам основан на

простой и эвристически понятной гипотезе. Получаемые с помощью него результаты наглядны и не содержат систематических ошибок. Точность метода исключительно высока: в статических экспериментах при использовании рентгенопленки составляет приблизительно 0,3%, при использовании современных регистраторов на основе пакетов фотохромных экранов достигает 0,05%. Более того, оказалось, что регистрируется ошибка в определении коэффициента рентгеносъемки в четвертом знаке после запятой (!), что соответствует ошибке измерения расстояния от источника излучения до объекта в 3 мм при характерном значении этого расстояния в 4 м. Подобная точность не свойственна классической технической рентгенографии, использующей установки с жестким спектром излучения ($E_{Tp}^{\gamma} \approx 50 \text{ M} \rightarrow \text{B}$) [4].

Благодарности. Автор благодарит сотрудников ИФВ М. А. Мочалова и В. Д. Орлова за любезно предоставленный иллюстративный материал.

Литература

- 1. В. Д. Урлин, М. А. Мочалов, О. Л. Михайлова, ЖЭТФ 111 вып. 6, 2099 (1997).
- 2.О. Л. Михайлова, М. А. Мочалов, А. И. Соколова, В. Д. Урлин, Теплофизика высоких температур, 38, №2, 227 (2000).
 - 3. У. Претт. «Цифровая обработка изображений», М.: Мир, 1982.
 - 4. А. Роуз. «Зрение человека и электронное зрение», М.:Мир, 1977.



Arinin V.

The Institute of Explosive Physics of Russian Federal Nuclear Centre, All-Russia Scientific Researching Institute of Experimental Physics

Abstract. For investigation of properties of substances in the field of megabar pressures of a gamut and for diminution of effects of a nonreversible heating the technique of an quasiisentropic loading in experimental devices of cylindrical geometry using energy of explosive substances is used. The most known method of processing of X-ray images gained in these experiments is the method of expert estimations. But, because of inevitable human-dependance, the processing results were not too reliable. The application as alternative of a gradient method does not ensure acceptable precision because of unmanageable regular errors. The nature of cylindrical geometry allows to improve a statistician of the image by addition of its lines which are perpendicular to symmetry axis of the experimental device, it makes applicable the method of functional tracing. For its use in a cylindrical case the following contiguous problems were solved.

- Definition of a direction of a symmetry axis with the purpose of exact orientation of the image.
- Definition of the location of a symmetry axis for measuring of asymmetry of the device working.
- Contextual elimination of nonuniformity of an exposition of the image with the purpose of minimization of errors of functional tracing.

The offered method of determination of bounds of two substances is based on a simple and heuristically clear hypothesis. The results of the method application are obvious and do not contain systematic errors. The precision of a method is exclusive: in static X-ray experiments when a film is used the errors approximately equal to 0,3%, the application of the modern recorders on the basis of packages of photo-chromatic screens reduces errors to 0,05%. Moreover, the error of definition of magnification coefficient of X-ray recording occurs in the fourth sign after a point (!). It is equivalent to an error of measuring of distance from a radiation source up to object is equal to 3 mm when its typical value is equal to 4 m. The similar precision is not peculiar to classical technical radiographic analysis, especially when X-ray source has high-energy spectrum of radiation ($E_{eff}^{\gamma} \approx 50 \text{ MeV}$).
