

ФУНКЦИОНАЛЬНЫЙ МЕТОД ТРАССИРОВКИ ГРАНИЦ РАЗДЕЛА ДВУХ СРЕД, ИМЕЮЩИХ ЦИЛИНДРИЧЕСКУЮ ГЕОМЕТРИЮ

Аринин В. А.

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 рентгено снимков 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].

Предлагаемый метод трассировки цилиндрических границ на статических рентгено снимках показал его высокую точность.

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 рамках данной работы для цилиндрического случая решены следующие задачи: определение направления оси симметрии для правильной ориентации изображения; определение положения оси симметрии для измерения асимметрии в работе устройства; контекстное устранение неравномерности экспозиции изображения, минимизирующее ошибки функциональной трассировки.

Исходные данные. Типичные рентгено снимки работы устройств цилиндрической геометрии приведены на рис. 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.

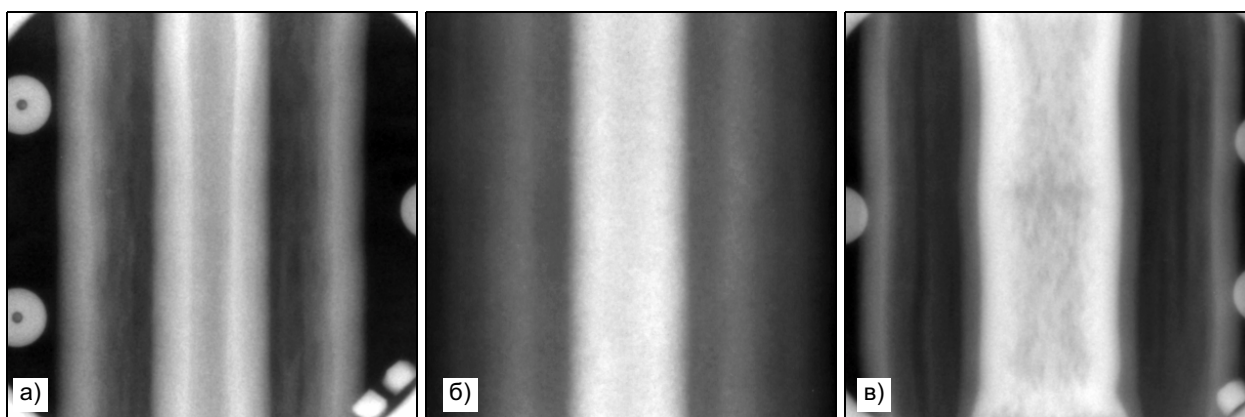


Рис. 1. Примеры рентгено снимков работы устройств цилиндрической геометрии

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

1. 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.

2. Искажения передаточной характеристики и взаимное влияние границ друг на друга в коаксиальной геометрии несущественно исказят приграничную функцию.

3. Функция, аппроксимирующая изображение ближе к его оси, при пересечении на границе с функцией, аппроксимирующей изображение с дру-

гой стороны границы, в точке пересечения должна иметь бесконечную производную. Точка пересечения является искомой координатой границы.

4. Размытие изображения компенсируется экстраполяцией данных в окрестность границы.

5. Наличие шумов на изображении не вызывает систематической ошибки.

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

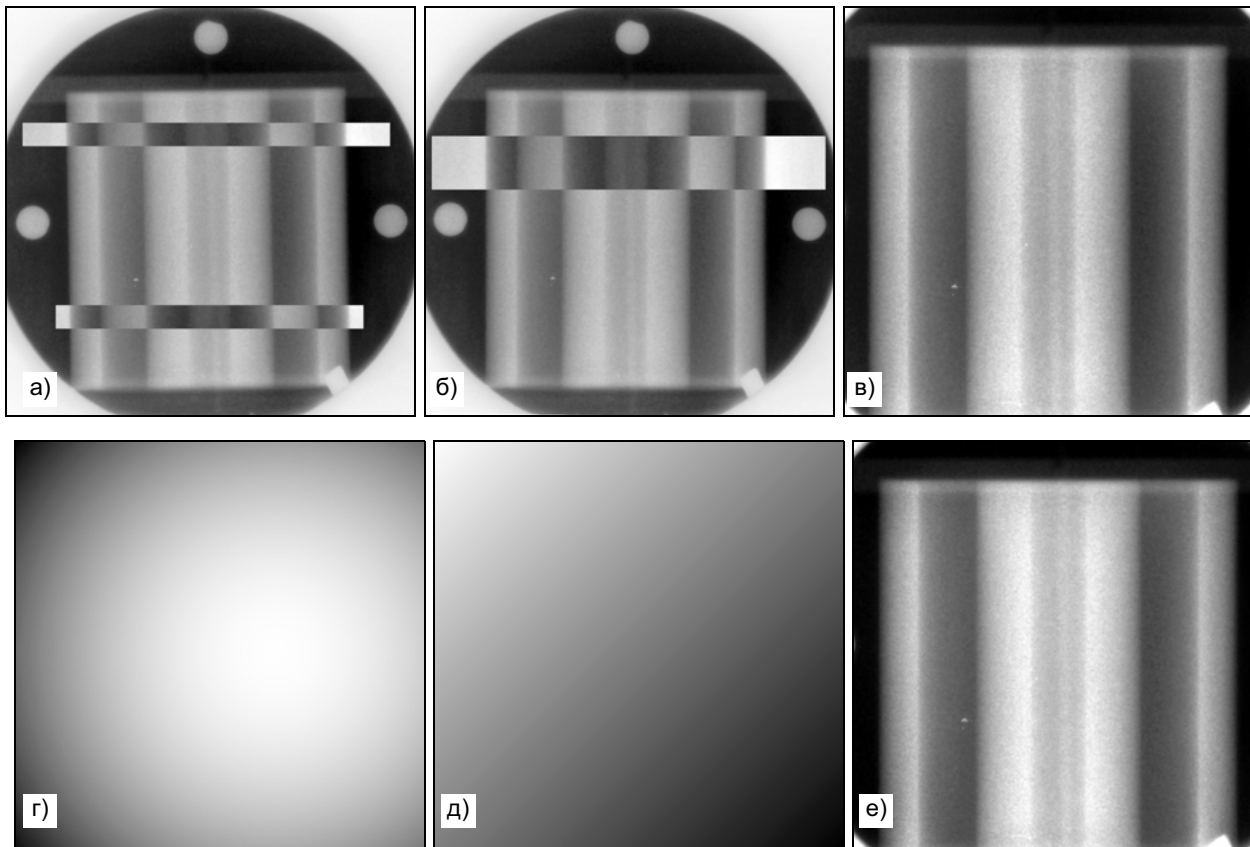


Рис. 2. Подготовка изображений к трассировке границ

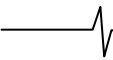
Подготовка изображений: ориентация оси симметрии. В общем случае при проведении рентгено съемки ось симметрии устройства образует с вертикалью некоторый угол. Это не позволяет напрямую суммировать строки изображения с целью получения качественного функционального профиля. Для определения угла наклона 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 более длинной. Для каждой полосы просуммируем столбцы с целью получения одномерных дискретных функций. Пусть длина базовой функции - M элементов, а второй N элементов, причем $M > N$. Тогда, делая выборки из базовой функции длиной N слева направо в шаг 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 второй функции.

$$k_{\text{корр}} = \frac{\sum_{i=1}^N a_i b_i}{\sqrt{\sum_{i=1}^N a_i^2 \cdot \sum_{i=1}^N b_i^2}} \quad (1)$$

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

$$\Delta i = \frac{1}{2} \cdot \frac{k_{i-1} - k_{i+1}}{k_{i+1} - 2k_i + k_{i-1}}$$

Положение максимума функции корреляции определяет сдвиг нижней полосы относительно верхней, что, с учетом расстояния между полосами, позволяет найти угол поворота. На рис. 2, а полосы, выбранные для корреляции, показаны негативом. Определенный по ним угол поворота, ориентирующего ось симметрии вертикально, составил $-1,087^\circ$. Результат поворота показан на рис. 2, б.



Подготовка изображений: определение положения оси симметрии снимка. Эта операция не обязательна, но весьма полезна, так как позволяет определить степень асимметрии границ. 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 положение оси. На рис. 2б выбранная полоса показана негативом. Изображение в) представляет собой фрагмент изображения б), вырезанный так, чтобы ось симметрии проходила точно по его середине.

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 рис. 2,г,д приведены сферическая и линейная маски, использовавшиеся при коррекции неравномерности поля экспозиции снимка, представленного на рис. 2,в. Диапазон значений сферической маски составил $0,801 \div 1$, линейной – $0,962 \div 1$.

Трассировка. На рис. 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).

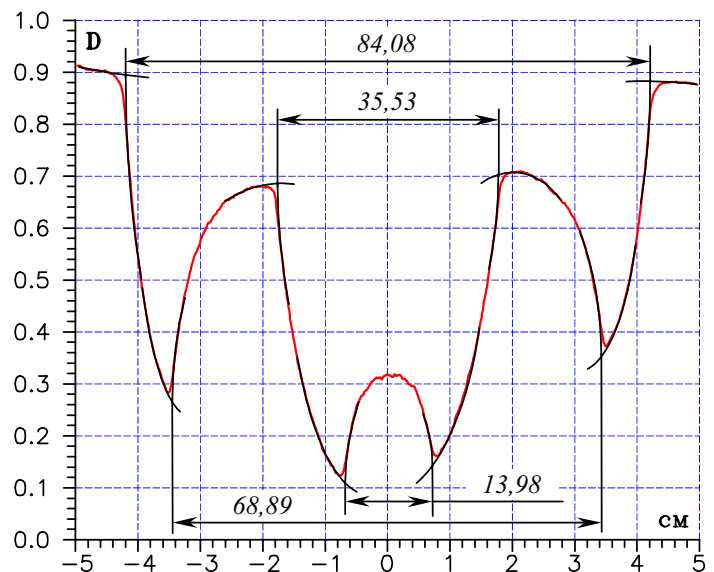
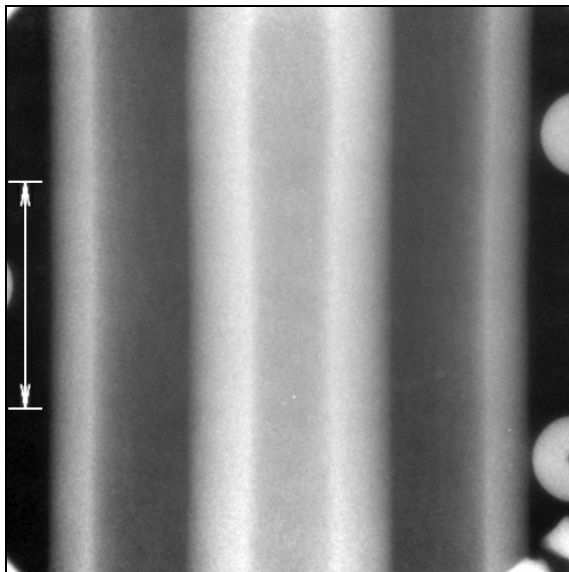


Рис. 3. Трассировка границ в устройствах цилиндрической геометрии

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 $7 \div 10$ выборкам, для устранения влияния возможного дрейфа радиусов по вертикали на искомую погрешность, выборки следует делать чересстрочно. 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 $\sigma = \sigma_{pt} \sqrt{2/n}$. 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 рентгено съемки теста, близкого по характеристикам к состоянию экспериментального устройства на момент регистрации и при тех же условиях съемки. Полученное значение σ_{ist} 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 все-

гда фиксируется). Увеличение погрешности из-за динамической нерезкости связано с необходимостью экстраполяции приграничных функций на большее 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 рентгенограммам 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 рентгенопоглощения 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 ($E_{\text{гп}} \approx 50$ МэВ) [4].

Автор благодарит сотрудников Института физики взрыва Российского Федерального ядерного центра ВНИИ экспериментальной физики 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.

НОВЫЕ КНИГИ!

Гонсалес Р., Вудс Р. Цифровая обработка изображений \ М.: Техносфера, 2005. – 1072 с.

Монография раскрывает базовые понятия и методологию компьютерной обработки изображений, дает основы для дальнейшего изучения этой многогранной и быстро развивающейся области. Является одним из наиболее популярных, известных в мире и полных учебников в области теории и методов цифровой обработки видеоинформации.

Рассмотрены все основные направления обработки и анализа изображений, включая основы теории восприятия и регистрации видеоинформации, методы фильтрации, вейвлет-преобразования, улучшения, восстановления и сжатия черно-белых и цветных изображений. Обсуждаются также вопросы сегментации, распознавания образов, описания и представления деталей, морфологического анализа изображения. Все разделы сопровождаются большим количеством примеров и иллюстраций.

Книга рассчитана на научных работников и профессиональных программистов, специалистов по компьютерному дизайну, студентов и преподавателей.