



ТОМОГРАФИЧЕСКАЯ ВИЗУАЛИЗАЦИЯ И КОНТРОЛЬ ТОЛЩИНЫ СТенок ТРУБ ПО ОГРАНИЧЕННЫМ РЕНТГЕНОВСКИМ ДАННЫМ

В. Л. ВЕНГРИНОВИЧ, С. А. ЗОЛОТАРЕВ, У. ЕВЕРТ, Б. РЕДМЕР, Г.-Р. ТИЛЛАК

Рассмотрена новая компьютерная технология для реконструкции изображений труб по рентгеновским проекциям в ограниченном угле обзора для зашумленных данных. Она позволяет осуществлять точное измерение толщины стенок трубы и параметров дефектов сплошности. Описана механизированная радиометрическая система, предназначенная для неразрушающего контроля кольцевых сварных швов. Показано, что использование принципа слияния данных для планарной томографии позволяет существенно повысить информативность и надежность производственной экспертизы труб.

A new computer technology is considered for reconstruction of pipe images by X-ray projections and limited viewing angle for noisy data. It allows taking accurate measurements of the wall thickness of the pipe and parameters of continuity defects. A mechanized radiometric system is described, which is designed for nondestructive testing of circular welds. It is shown that use of the principle of data merging for planar tomography allows a significant increase of the information content and reliability of production examination of pipes.

В ряде промышленных отраслей, таких, как химическая и нефтехимическая, энергетика, трубопроводный транспорт и др. определение толщины стенок транспортирующих труб, а также выявление дефектов сплошности труб является проблемой жизнеспособности конструкции и ее безопасной эксплуатации [1]. Часто для получения этих оценок приходится применять несколько методов неразрушающего контроля (НК), например, вихревой, ультразвуковой и рентгеновский.

Все рассмотренные методы, кроме основанных на рентгенографии [2, 3], можно применять только с датчиками, которые или непосредственно вставлены в контролируемую трубу, или имеется возможность прямого контакта с наружной поверхностью трубы [4, 5]. Рентгеновская радиография позволяет бесконтактно обследовать внешнюю и внутреннюю поверхности трубы, однако точные оценки коррозионных и других повреждений по данным радиограмм невозможны. Рентгенографические методы дают лишь плоское изображение объемной картины и поэтому оценки, производимые с их помощью, являются весьма приближенными. Проблема могла бы быть решена путем получения и анализа трехмерных томографических изображений труб, однако классическая компьютерная томография (КТ) не применима при ограниченном доступе к трубе — случай, реально имеющий место на практике. Наибольшее применение в рамках поставленной задачи — тотальной толщинометрии — имеет ультразвук, однако трудоемкость метода при работе с большими поверхностями трубы и необходимость хорошего контакта датчика с поверхностью ограничивают область его применения. Пленочная и цифровая рентгеноскопия также возможны, но из-за указанных ограничений и необходимости использования мощного источника γ -излучения, например, Ir-192 с

малым периодом полураспада, не нашли пока широкого применения.

Указанные ограничения целиком распространяются на дефектоскопию кольцевых сварных соединений труб. Необходимость прямого контакта, большая трудоемкость, ограниченность доступа и неопределенность количественных оценок дефектов значительно снижают эффективность применения рентгенографических, ультразвуковых и электромагнитных технологий.

Развитие новых методов реконструкции двумерных и трехмерных изображений и томографической визуализации, основанной, например, на принципах многоступенчатой томографии (МСТ), использующей малое число проекций и ограниченный угол обзора [4, 6, 7], является целью данной статьи.

Принципиальными препятствиями для прямого применения МСТ являются:

отсутствие специального оборудования, позволяющего получать необходимые проекции за экономически обоснованный промежуток времени;

отсутствие рациональной компьютерной технологии для реконструкции изображения трубы при ее сквозном просвечивании вследствие значительных эффектов вырождения и неопределенности из-за ограниченного доступа к трубе.

В последнее время в Федеральном институте материаловедения и испытаний (ВАМ, Берлин) разработана механизированная радиометрическая система, адаптированная к широкому диапазону диаметров труб и позволяющая в автоматическом режиме получать набор плоских рентгеновских изображений продольных сечений трубы в угле обзора 400...450° [2]. Поскольку описанные ниже вычислительные алгоритмы и программное обеспечение проверялись, как правило, на разработанной в ВАМ томографической системе для ме-

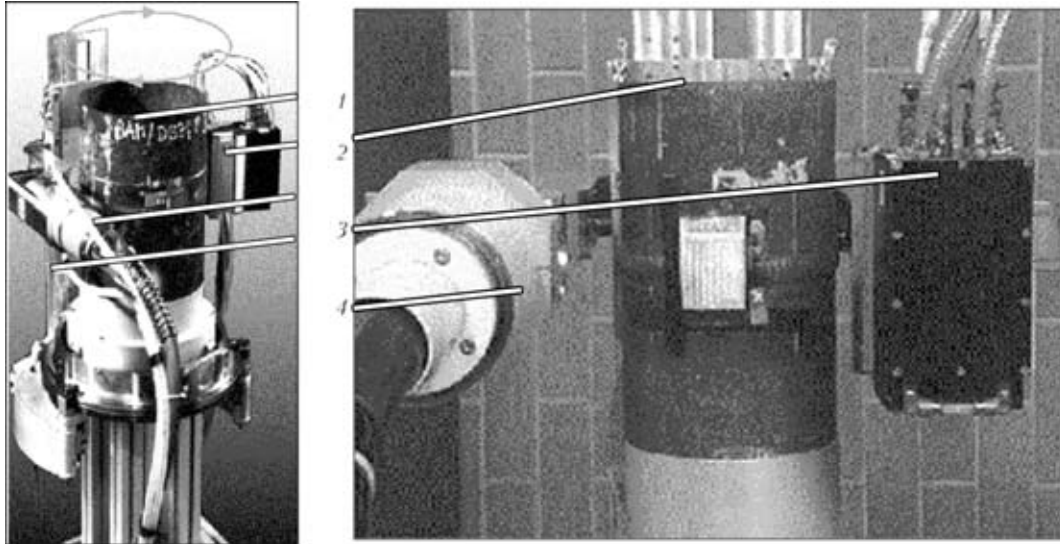


Рис. 1. Томографическая компьютерная установка для механизированной радиометрии: 1 — тестируемая труба; 2 — линейный детектор; 3 — рентгеновская трубка; 4 — манипулятор

ханизированной радиометрии (ТомоСАР), мы приведем здесь краткое описание и принцип действия данной установки. Внешний вид установки показан на рис. 1. Механизированная радиометрическая система создана для осмотра кольцевых швов и производственной экспертизы аустенитных и ферритных труб. Основной ее задачей является обнаружение и установление размеров трещин. Рентгеновская трубка и линейка детекторов устанавливаются на контролируемую трубу через угол в 180° , так, чтобы круговой сварной шов мог быть отсканирован при синхронном вращательном движении рентгеновской трубки и линейной матрицы детекторов. Круговое сканирование обеспечивает достаточное количество информации для трехмерной реконструкции структуры сварного шва. Могут контролироваться трубы диаметром от 176 до 500 мм. Манипулятор устанавливается на тестируемую трубу и крепится к ней ремнями. Все дальнейшие операции выполняются с использованием автоматизированной системы управления и аппаратных средств сбора данных. Максимальный угол обзора при круговой схеме сбора данных составляет 90° . Масса манипулятора составляет приблизительно 15 кг, рентгеновской трубки — около 11 кг, линейной матрицы детекторов — 2 кг. Размер пикселя равен 83 мкм при 1856 пикселях в линейке детекторов, энергия рентгенов-

кой трубки — 225 кВт, размер фокусного пятна — 0,4 или 1,5 мм. Для достижения более высокой точности измерения толщины стенок труб может быть использован принцип планарной томографии. С этой целью рентгеновская трубка непрерывно смещается параллельно оси трубы. В зависимости от диаметра трубы угол обзора достигает 45° . При движении рентгеновской трубки снимают, как правило, 400 одномерных проекций. Разработанная нами технология реконструкции для такой схемы просвечивания позволяет реконструировать толщины стенок трубы с точностью до 0,5 мм.

Цель данной статьи состоит в разработке компьютерной методики для полного восстановления изображения трубы по рентгеновским проекциям в ограниченном угле обзора при наличии зашумленных данных, позволяющей точное виртуальное измерение толщины стенок трубы и параметров дефектов сплошности. Представлены результаты многолетних исследований в ИПФ и ВАМ по созданию работоспособных технологий для томографической визуализации труб из существенно неполных данных, совместимых с современной рентгеновской аппаратурой. Представлены две базовые технологии томографической визуализации (ТВ), основанные, соответственно, на двух схемах просвечивания. Алгоритмические основы различных технологий для трехмерной томографической визуализации описаны, например, в работах [8–10]. Для иллюстрации потенциальных возможностей данных технологий приведем лишь один из результатов реконструкции специального тестового образца ВАМ, представляющего собой трубу диаметром 112 мм с толщиной стенки 3,6 мм из нержавеющей стали. Оценка абсолютной точности виртуального измерения размеров в произвольном сечении трубы после ТВ позволяет сделать вывод, что она не превышает 300 мкм. Схема сбора данных для данной рекон-

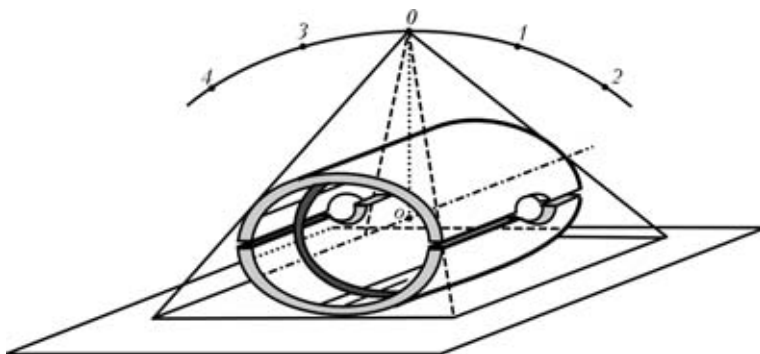


Рис. 2. Схема просвечивания объекта при трехмерной томографической визуализации

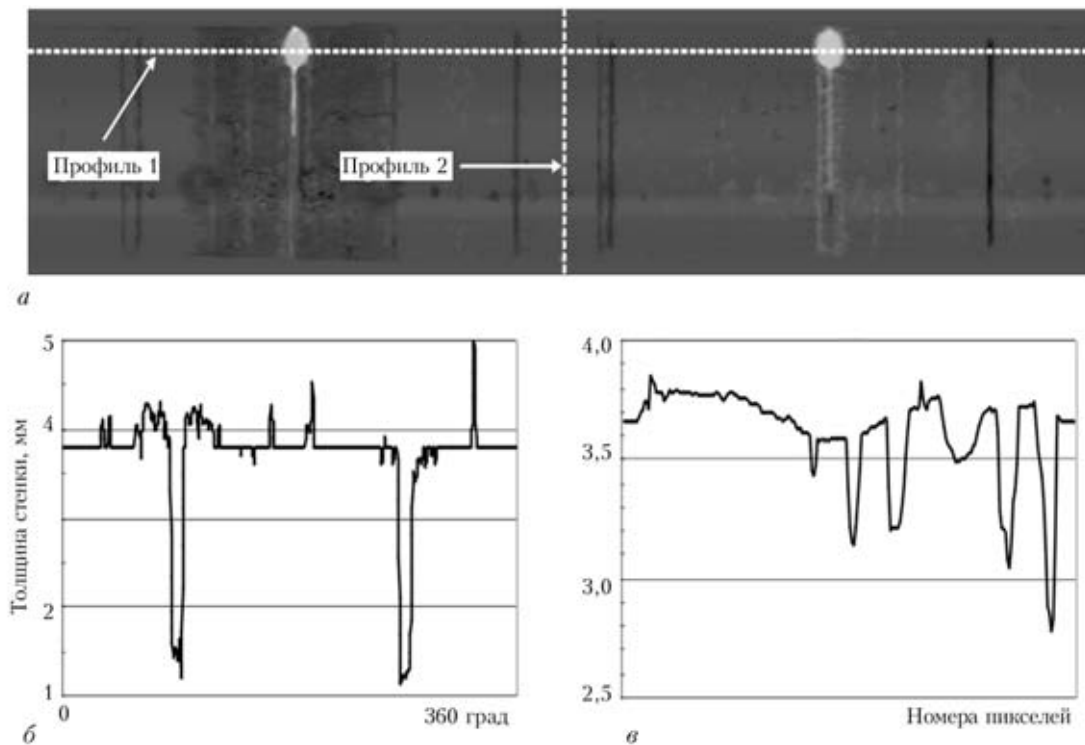


Рис. 3. Развертка реконструированного изображения трубы (а) и два сечения (б) и (в)

струкции представлена на рис. 2. Результат реконструкции в виде развертки трубы изнутри представлен на рис. 3.

Планарная томография сварных швов трубопроводов. Синтез изображений. На рис. 4 показана схема просвечивания продольного сечения трубы на установке механизированной радиометрии, разработанной в ВАМ. Коллимированный в продольной плоскости источник излучения перемещается вдоль линии S-line, так что за один проход он производит до 1200 импульсов излучения, регистрируемого линейным детектором *D*, передающим информацию в компьютер. Образуется так называемая плоская синограмма, каждая строка которой является результатом одноимпульсного просвечивания. Синограмма является источником первичных данных для реконструкции. После ее предобработки в виде белой и черной коррекции данные поступают на вход алгоритма реконструкции. Дальнейшая проблема состоит в том, что из-за острой нехватки данных вследствие малого угла обзора (всего 35...45° вместо требуемых 180°) ТВ методом фильтрованных обратных проекций (ФОП) позволяет получить лишь расплывчатое изображение трубы с большим количеством артефактов (рис. 5, *слева*). Видно, что даже стенки трубы исчезают на изображении, в то время, как к контрастным дефектам (трещинам, непроварам и др.) метод ФОП весьма чувствителен.

Разработанная нами технология реконструкции с использованием концепции МСТ позволяет получать в целом качественное изображение. Однако, в связи с использованием сглаживающей априорной информации разрешение может оказаться недостаточным для выявления особо мелких дефектов. Новая технология синтеза обоих методов

позволяет получить высококонтрастное изображение всего объекта (рис. 5, *справа*) и виртуально провести все линейные измерения на объекте с погрешностью не более 500 мкм. Опишем далее основные математические принципы, положенные в основу обоих подходов. Хотя мы рассматриваем далее алгоритм для планарной томографии, сама методология практически без изменений переносится и на трехмерный случай.

Математический алгоритм планарной томографии. Основные определения. Рассматривается нелинейное операторное уравнение

$$A(\sum_k R_k(M)) = F^{\rightarrow} \quad (1)$$

Здесь F^{\rightarrow} — совокупность измеренных данных для всех проекций. Для *N* проекций

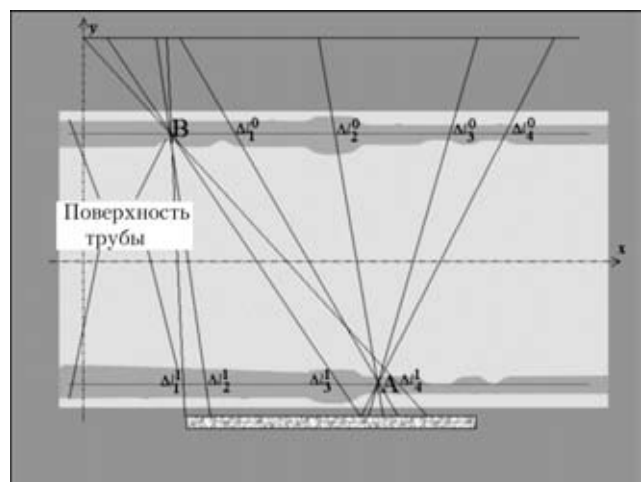


Рис. 4. Схема просвечивания для планарной томографии

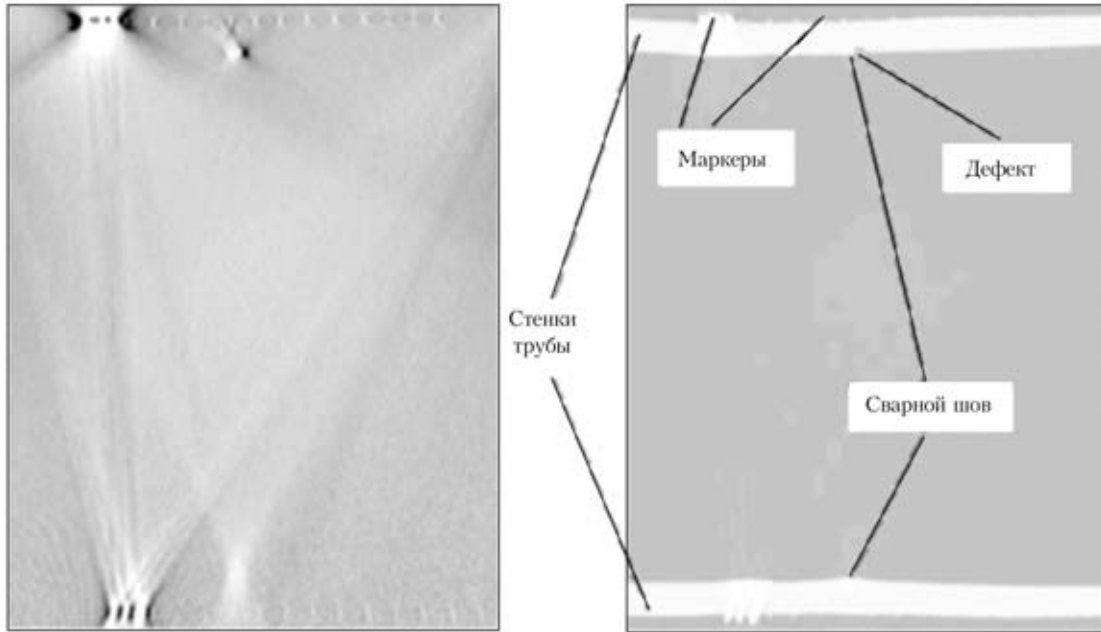


Рис. 5. Изображение трубы, полученное ФОП (слева) и синтезированное ФОП+МСТ (справа)

$\vec{F} = \{f_n^m\}$, $n = 1, \bar{N}$, где функция $f_n^m(p)$ — измеренные данные на n -й проекции; $\{p_j^n: j = 1, \bar{J}_n\}$ — позиции пикселей n -й проекции; ϑ_n — угол проецирования для n -й проекции; $J = \sum_n J_n$ — суммарное число пикселей на всех проекциях. Векторы $\vec{R}_k(M)$ — радиус-векторы текущих точек деформируемых поверхностей $M^{(k)}(x, y, z)$, $\{M_i^{(k)}: i = 1, \bar{I}\}$ — позиции узлов решеток деформируемых поверхностей. Оператор A связывает деформируемые поверхности $S^{(k)}$, определяемые как годографы концов векторов $\vec{R}_k(M)$ и проекции объекта, т. е.

$$A(\sum_k \vec{R}_k(M)) = \{(A(\vec{R}_k(M)))^n\}, n = 1, \bar{N}.$$

Здесь $(A(\sum_k \vec{R}_k(M)))_n = f_n^c(p)$ — расчетные данные n -й проекции. Используется *линейная геометрия* — рентгеновская трубка перемещается линейно вдоль контролируемой трубы от -100 до 100 мм относительно центра фильма. Просвечивание осуществляется коллимированным веерным пучком. Для *линейной геометрии* используются 400 проекций, соответствующих последовательным положениям источника через 0,5 мм. Кроме того, мы рассматриваем двумерный объект контроля, описываемый четырьмя оболочками. Каждая из них задается с помощью одномерной линейной сетки и может быть представлена в виде совокупности линейных элементов. Линейный элемент представляет собой отрезок. Для отрезков с первого по предпоследний включительно левая точка принадлежит отрезку, а правая — нет. Последний отрезок, наоборот, включает в себя правый конец

и не включает левого. При таком разбиении границы любого из отрезков не имеют общих точек с границами соседних отрезков.

Расчет прямого оператора. Осуществляется последовательный перебор всех элементов четырех оболочек и для каждой из них: а) находится проекция отрезка S_n на текущую линию детекторов; б) устанавливаются границы отрезка σ_n^n ; в) определяются все пиксели $p_j^n: j = 1, \bar{J}_n$, центры которых лежат внутри отрезка σ_n^n или на его границах; г) рассчитываются точки пересечения лучей, проходящих через центры внутренних и граничных пикселей отрезка σ_n^n с данной поверхностью объекта.

Вычисление точек пересечения с поверхностью сводится к пересечению соответствующих лучей с прямой, определяемой элементом S_n . После определения всех точек пересечения, лежащих на конкретном луче, осуществляется их сортировка по возрастанию параметра прямой, на которой лежит луч. Число точек пересечения для каждого луча всегда будет четным. Вычисляя расстояния между соответствующими парами точек и суммируя их, определим лучевую сумму $f_n^c(p)$ для пикселя $p_j^n: j = 1, \bar{J}_n$, определяющего данный луч.

Таким образом, после обхода всех проекций и расчета прямого оператора

$$A(\sum_k \vec{R}_k(M))_n = f_n^c(p), n = 1, \bar{N},$$

мы определим все расчетные лучевые суммы. Функционал

$$\delta_n(\sum_k \vec{R}_k(M)) = \sum_k |f_n^c(p) - f_n^m(p)| / \sum_k f_n^m(p) \quad (2)$$



измеряет суммарное отклонение поверхностей $S^{(k)}$, заданными дискретными решетками узлов

$M_i^{(k)}$, $i = \overline{1, I}$, от реальных поверхностей, в направлении n -й проекции. Среднее значение отклонения

$$\delta_{\text{mid}}(\sum_k \overline{R}_k(M)) = \sum_n \delta_n(\sum_k \overline{R}_k(M))/N. \quad (3)$$

Принцип деформации поверхностей объекта.

Для реконструкции внутренней поверхности объекта используется итерационная процедура, обеспечивающая последовательную минимизацию функционала невязки (3). Эта процедура проводится следующим образом: осуществляется последовательный перебор всех узловых точек деформируемых поверхностей $M_i^{(k)}$, $i = \overline{1, I}$. Через каждую узловую точку $M_i^{(k)}$ проводим N лучей, которые пересекут соответствующие линии детекторов в пикселях p_j^n , $i = \overline{1, I}$. Для этих пикселей вычисляем разности между измеренными и вычисленными значениями лучевых сумм $\Delta f_n(p) = f_n^e(p) - f_n^m(p)$. Потом находим среднюю разность

$$\sum_n (M_i^{(k)}) = \sum_n \Delta f_n(p)/N. \quad (4)$$

Величина смещения узла $M_i^{(k)}$ будет

$$h(M_i^{(k)}) = \lambda^{(0)*} \sum_n (M_i^{(k)}), \quad (5)$$

где $\lambda^{(0)}$ — величина параметра релаксации для первой итерации. Смещение проводится вдоль прямой, проведенной из данного узла $M_i^{(k)}$ параллельно оси ординат. Смещение поверхности осуществляется для всех узловых точек $M_i^{(k)}$, $i = \overline{1, I}$, одновременно. После смещения всех узловых точек $M_i^{(k)}$ получим новую дискретную решетку $M_i^{(k)}$, $i = \overline{1, I}$. Итерационный процесс останавливается, если для трех последовательных итераций не удается получить лучшее приближение. Каждая из оболочек деформируется независимо от остальных.

Выводы

Разработанные методы реконструкции 2- и 3-мерных изображений объектов по ограниченному числу рентгеноскопических проекций обеспечивают хорошее качество реконструкции и позволяют с достаточной для практических целей точностью оценивать толщины стенок труб. В целом, разработанные компьютерные технологии в сочетании с современными радиоскопическими системами, позволяют осуществить высокоточную томографическую визуализацию технологических трубопроводов, которая может быть положена в основу прогнозирования ресурса последних.

1. *Трехмерная томографическая визуализация труб в процессе эксплуатации* / В. Л. Венгринович, С. А. Золотарев, Ю. Б. Денкевич, Г.-Р. Тиллак // Матер. 4-й Национальной науч.-техн. конференции «Неразрушающий контроль и техническая диагностика», Киев, 2003. — С. 46–50.
2. *Mechanised Weld Inspection by Tomographic Computer Aided Radiometry (TomoCAR)* / B. Redmer, J. Robbel, V. Ewert, V. Vengrinovich // Proceedings of 8-th European conf. for non Destructive Testing. AIPnD, Barselona, Nuclear, 2002. — P. 121–129.
3. *Schmidt T. R. History of the Remote Field Eddy-Current Inspection Techniqu* // Materials Evaluation. — 1989. — 47, № 1. — P. 14–22.
4. *Alleyn D., P. Cawley. The Long Range Detection of Corrosion in Pipes Using Lamb Waves* // Review of Progress in QNDE, 14B, Ed., D. O. Thompson and D. E. Chimenti, New York, NY, Plenum Press, 1995. — P. 2073–2080.
5. *Krzywoswz K. Flaw Detection and Characterization in Heat Exchanger Tubing* // EPRI report № GC 111672, December 1998.
6. *Anmol S. Birring. election of NDT Techniques for Heat Exchanger Tubing* // Materials Evaluation. — 2001. — 59, № 3. — P. 382–391.
7. *Fisher J. L. Remote Field Eddy-Current Inspection* // ASM Handbook. — 1992. — 17. — P. 195–201.
8. *New technique for 2D an 3D x-ray image restoration of pipes in service given a limited access for observation* / V. Vengrinovich, S. Zolotarev, A. Kuntsevich, G.-R. Tillack // Review of Progress in QNDE, ed. by D. O. Tompson and D. E. Chimenti, 20A, American Institute of Physics, Melville-N.Y, 2001. — P. 756–763.
9. *Vengrinovich V., Denkevich Yu., Tillack G.-R. Reconstruction of Three-Dimensional Binary Structures from an Extremely Limited Number of Cone-Beam x-ray Projections* // Choise of Prior. Journal of Phys., D: Applied Physics. — 1999. — 32. — P. 2505–2514.
10. *Vengrinovich V., Denkevich Yu., Tillack G.-R. Bayesian 3D x-ray reconstruction from incomplete noisy data* // Maximum Entropy and Bayesian Methods, ed. by W. von der Linden et. al., Kluwer Academic Publishers, 1999. — P. 73–83.

Ин-т прикладной физики НАН Белорусии, Минск
Федеральн. ин-т материаловедения и испытаний, Берлин

Поступила в редакцию
26.02.2004