

**МЕТОДЫ ОБРАБОТКИ СИГНАЛОВ И ИЗОБРАЖЕНИЙ**

УДК 620.179.15

**Ю. А. Жуков, Ю. К. Карлов, Э. П. Косых, А. К. Поташников,  
Ю. В. Обидин, С. Б. Чашин**

*(Новосибирск)*

**КОМПЬЮТЕРНАЯ ТОМОГРАФИЯ  
В ЗАДАЧАХ КОНТРОЛЯ СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ ТВЭЛ**

Излагаются результаты экспериментальных исследований, выполненных в процессе создания томографа, в котором реализованы два режима: реконструкции сечений и панорамный. Обоснована и подтверждена экспериментами перспективность использования цифровой панорамной томографии в задачах контроля сварных соединений стержневых теплоделяющих элементов (ТВЭЛ). Дано описание томографа, и приведены экспериментально подтвержденные технические характеристики: производительность контроля 60 изд./ч, чувствительность к локальным дефектам типа воздушных пор 100 мкм.

Повышенные требования к надежности объектов атомной энергетики обуславливают совершенствование методов и аппаратуры неразрушающего контроля теплоделяющих элементов (ТВЭЛ) ядерных реакторов. Наиболее часто эта задача решается методами радиационной дефектоскопии [1]. Однако с точки зрения выявляемости дефектов и чувствительности метода приоритет следует отдать реконструктивной вычислительной томографии (РВТ), сочетающей в себе информационные возможности радиационных методов контроля, новейшие достижения вычислительной техники, а также современные технологии цифровой обработки изображений. Несмотря на высокую стоимость томографического оборудования, оно все шире начинает использоваться для неразрушающего контроля наиболее сложных и ответственных узлов энергетических систем [2, 3].

Методы и принципиальные решения, используемые в РВТ, хорошо известны. Совершенствование реконструктивных томографов идет в направлении повышения быстродействия, пространственного разрешения и развития методов обработки теневых изображений. В данной статье изложены результаты работы по созданию быстродействующей томографической установки с высоким разрешением, предназначенной для контроля сварных соединений стержневых теплоделяющих элементов. Объект контроля (ОК) представляет собой циркониевую трубку диаметром 9,1 мм и длиной более 4 м. Трубка заполнена топливом и с обоих концов закрыта приварными заглушками. Область контроля (сварного шва) имеет форму цилиндра высотой около 2 мм. Типичными дефектами являются воздушные поры диаметром более 100 мкм, скопления мелких пор, локальные трещины или непровары. Внутренняя структура шва однозначно характеризуется функцией  $\mu(x, y)$  зависимости линейного коэффициента ослабления (ЛКО) материала от координат в области шва ТВЭЛ.

Практически точность реконструкции ограничивается погрешностями проекционных данных, которые, в свою очередь, обусловлены флуктуациями потока рентгеновских квантов и шумами измерительного тракта. Кроме того,

в реальных системах время экспозиции обычно ограничено, поэтому методы накопления не позволяют в полной мере подавить шумы. Дополнительные проблемы связаны с высоким поглощением в цирконии и малыми размерами дефектов, подлежащих обнаружению. Все это приводит к снижению отношения сигнал/шум и усложнению алгоритмов автоматического обнаружения дефектов.

Как показано в [4], минимальный размер обнаруживаемых методами РВТ дефектов прямо пропорционален корню квадратному из толщины контролируемого слоя и обратно пропорционален пределу пространственного разрешения, контрасту ЛКО дефекта и корню квадратному из дозы:

$$V_d = \xi_V |C_d|^{-1} \alpha^{1/2} D_0^{-1/2} k_m^{-1},$$

где  $V_d$  — минимальный объем надежно обнаруживаемого локального дефекта;  $\xi_V$  — коэффициент пропорциональности;  $C_d = (\mu_d - \mu_f) / \mu_f$  — контраст ЛКО дефекта и фона;  $\alpha$  — ширина контролируемого слоя;  $D_0$  — экспозиционная доза,  $k_m$  — предел пространственного разрешения. Для дефектов типа воздушных пор контраст ЛКО равен  $-1$ . Таким образом, необходимая обнаружительная способность может быть достигнута повышением экспозиционной дозы и (или) пространственного разрешения. Поэтому в созданном томографе приняты меры к оптимальному использованию экспозиционной дозы и повышению пространственного разрешения.

Томограф содержит источник рентгеновского излучения, сканирующее устройство, детектор, систему сбора проекционных данных и персональный компьютер с программным обеспечением для управления узлами томографа и реконструкции сечений. В соответствии с условиями реализации проекта использован рентгеновский аппарат MG-164. Трубка аппарата имеет фокус 0,3 мм и работает при напряжении 160 кВ и токе анода 3 мА.

Прецизионное сканирующее устройство с микропроцессорной системой управления обеспечивает подачу изделия в зону контроля, его зажим, вращение и осевое перемещение. Вращение и линейное перемещение ТВЭЛ производится шаговыми двигателями ДШИ-200. Фиксация изделия в шпинделе обеспечивается цапговым зажимом, который управляется с помощью пневмоавтоматики. Для контроля углового положения ОК специально для томографа разработан оптосин, имеющий 10 000 отсчетов на оборот. Подвижный вал оптосина соединен непосредственно со шпинделем устройства вращения, что обеспечивает высокую точность углового контроля. Подача ТВЭЛ в шпиндель осуществляется через сквозное отверстие вала оптосина.

На рис. 1 представлена зависимость погрешности сканирующего устройства от угла поворота шпинделя, полученная с использованием аттестованного

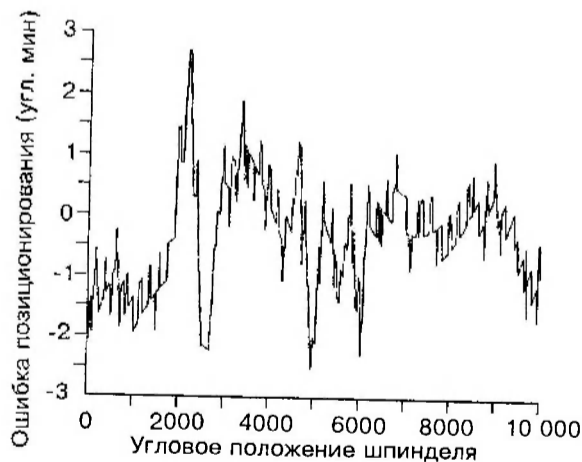


Рис. 1

углового датчика ROD-800 фирмы "Heidenhain". Ошибка узла вращения выражена в минутах, а угловое положение представлено количеством шагов двигателя. Полный оборот составляет 10 000 шагов. Как видно из рисунка, узел вращения имеет максимальную угловую погрешность установки шпинделя не более  $\pm 3$  угл. мин ( $\pm 1,5 \times 10^{-4}$  оборотов).

Минимизация радиальных биений ОК достигается с помощью центриатора, который одновременно является датчиком упора. Величина радиальных биений, измеренная с использованием специально изготовленного имитатора ТВЭЛ, не превышает 20 мкм.

Среднеквадратичное значение погрешности установки изделия в исходное состояние и ошибка линейного перемещения не превышают 5 мкм. Сканирующее устройство имеет малые габариты, автономное питание и управляется от ЭВМ через последовательный интерфейс RS-232.

Блок детекторов содержит сцинтиллятор, фотоприемное устройство (ФПУ) и оптическую систему для передачи светового сигнала от сцинтиллятора к ФПУ. Каждый из этих элементов влияет на обнаружительные характеристики томографа. Требование высокой производительности привело к необходимости применения матричного фотоприемника, в качестве которого используется фотодиодная матрица ФПУ-64. Размер элемента ФПУ равен  $80 \times 80$  мкм. Матрица содержит  $256 \times 32$  элемента, что позволяет одновременно накапливать 32 проекции (разных сечений) по 256 отсчетов в каждой. Система считывания ФПУ построена на 32-х зарядовых интеграторах, токовые выходы которых могут объединяться в группы по 8, 16 или 32. В детекторе считывание сигнала ФПУ производится по двум каналам одновременно, т. е. использован вариант объединения элементов фотоприемника в две подматрицы. Это позволило сократить время сбора проекционных данных и использовать АЦП с временем преобразования 1,6 мкс.

Теневое рентгеновское изображение преобразуется сцинтиллятором в видимое и переносится оптической системой на ФПУ. Защиту матрицы от прямого и рассеянного рентгеновских излучений обеспечивают входной коллиматор и стеклянная пластина из тяжелого флинта СТФ-110, установленная между сцинтиллятором и объективом. Все конструктивные элементы блока детектирования закреплены на стальном основании и закрыты свето-защитным кожухом. Матричный фотоприемник и оптика установлены на подвижных платформах. Такое решение позволяет изменять пространственное разрешение в измерительном канале и упрощает фокусировку.

Входной коллиматор представляет собой пластину из вольфрамоникелевого сплава, в центре которой имеется щель размером  $2 \times 11$  мм. Коллиматоры рентгеновского аппарата и блока детектирования формируют теневое изображение ОК в плоскости сцинтиллятора таким образом, чтобы при любых ракурсах зона контроля экспонировалась полностью. Этим достигается максимальная экспозиционная доза в пределах времени, отведенного на контроль ТВЭЛ.

Сцинтиллятор должен обеспечивать эффективное преобразование падающего рентгеновского излучения в световую энергию, а также обладать хорошей прозрачностью и незначительной диффузией света в направлении, перпендикулярном падающему пучку. Сцинтиллятор блока детектирования изготовлен из пластины монокристаллического CsI(Tl) размером  $6 \times 25$  мм, которая приклеена к стеклянной подложке. Для повышения разрешающей способности используется тонкий сцинтиллятор (1 мм). Обе поверхности сцинтиллятора отполированы. Со стороны, обращенной к объекту контроля, сцинтиллятор защищен от света непрозрачной пленкой.

Оптическая система собрана на основе двух встречно включенных объективов «Гелиос-44», причем из второго объектива используется только входная склейка и рассеивающая линза.

Детектор содержит формирователь сигналов управления фотодиодной матрицей и выходные усилители. Предусмотрена возможность гибкого управления от ЭВМ временем накопления изображения проекций, которое может изменяться от 10 мс до 0,5 с.

Сигналы с детектора поступают в систему сбора проекционных данных, имеющую модульную конструкцию. В состав системы сбора входят следующие модули: АЦП, буферная память и генератор поправок. Модуль АЦП содержит два (по числу каналов ФПУ) 12-разрядных преобразователя, работающих параллельно. Буферная память емкостью 1 Мбайт служит для накопления проекционных данных. По заполнении буфера информация сбрасывается в расширенную память компьютера. Все модули размещены в корпусе Minitower со стандартным блоком питания. Материнская плата имеет десять слотов для установки печатных плат, конструктивно совместимых с шиной ISA. Сигналы ISA шины в Minitower транслируются расширителем шины, который устанавливается в системный блок ЭВМ.

Энергия рентгеновского излучения аппарата МG-164 неоптимальна (недостаточна) для изделий из циркония толщиной 9 мм и не позволяет получить максимальную контрастность дефектов на снимках. Измеренная светимость сцинтиллятора под объектом контроля менее 0,1 кд/м<sup>2</sup>. Неоптимальная энергия излучения и потери в оптической системе приводят к тому, что освещенность ФПУ детектора составляет 2–3 % от номинальной. В этом случае электронные шумы канала регистрации, и в первую очередь коммутационные и тепловые шумы матрицы, существенно превышают пуассоновский шум рентгеновских квантов. Кроме того, неоднородность элементов ФПУ, связанная с разбросом темновых токов и чувствительности, в несколько раз превышает динамический диапазон сигнала.

Для компенсации неоднородности ФПУ в томографе используется двухступенчатая система коррекции. Генератор поправок осуществляет грубую аппаратную коррекцию темновых токов до оцифровки сигнала. Для такой коррекции средние значения темновых токов отдельных ячеек ФПУ запоминаются в памяти поправок на этапе калибровки. В режиме регистрации поправки преобразуются в аналоговую форму и вычитаются из сигналов ФПУ. Первая ступень позволяет снизить разброс примерно в 30 раз.

Более точная коррекция осуществляется программно в процессе перезаписи проекционных данных в расширенную память ЭВМ. Для программной коррекции в памяти ЭВМ на этапе калибровки формируются два массива, один из которых ( $D_i$ ) содержит значения сигналов матрицы при отсутствии рентгеновского излучения, а второй ( $L_i$ ) — при рентгеновской засветке. Калибровка второй ступени занимает 10–12 с и выполняется непосредственно перед контролем изделия. Истинное значение сигнала определяется выражением

$$I_i = K(I_i - D_i)/(L_i - D_i),$$

где  $I_i$  — зарегистрированный сигнал  $i$ -й ячейки ФПУ;  $K$  — масштабный коэффициент. Для обеспечения оптимальной контрастности выявляемых дефектов были проверены различные условия получения массива  $L_i$ : 1) без поглотителя при пониженном токе или напряжении рентгеновской трубки; 2) с плоскими поглотителями при рабочих режимах трубки; 3) со специальной маской; 4) непосредственно с объектом контроля.

Наилучшие результаты дает калибровка непосредственно по объекту контроля. Для уменьшения влияния возможных дефектов проводится их осреднение за счет быстрого вращения ТВЭЛ вокруг оси в процессе формирования массива засветки. Калибровка по объекту контроля с дефектами типа пор даст хорошие результаты даже в том случае, когда выполняется один раз на 100 изделий. Если ОК имеет кольцевые дефекты (непровар шва), можно рекомендовать калибровку по области, соседней с контролируемой зоной.

Используемая система коррекции, наряду с неоднородностью элементов ФПУ, позволяет компенсировать виньетирование объектива, пространственную неравномерность световых выходов сцинтиллятора и температурный дрейф канала регистрации.

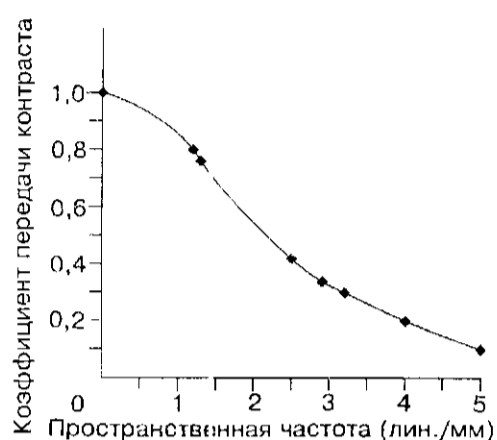


Рис. 2

Программное обеспечение томографа состоит из двух основных программ. Программа-монитор TVEL позволяет тестировать все узлы томографа, получать статистические характеристики сигнала, управлять процессом сбора и ввода в ЭВМ проекционных данных, отображать на экране терминала изображения проекций и записывать эти изображения в файл на диске. Она также поддерживает реализованный на аппаратном уровне алгоритм получения панорамных изображений.

Программа RECON производит реконструкцию сечений с использованием алгоритма фильтрации и обратного проецирования. Программа имеет открытый доступ к параметрам преобразования, позволяя восстанавливать сечения ОК по неполным наборам проекционных данных и ограниченным проекциям. Кроме основных программ, разработанный программный пакет содержит средства обработки изображений (фильтрация, двумерное преобразование Фурье, преобразование гистограмм) и средства визуализации серии последовательных сечений с возможностями управления яркостью, контрастностью и масштабом отображения. Для хранения изображений используется 16- или 8-разрядный формат TIFF.

Экспериментальный образец томографа прошел заводские испытания, в процессе которых исследовались пространственное разрешение, чувствительность, обнаружительная способность и производительность контроля. Практически для всех исследований устанавливались рабочие режимы томографа (энергия излучения, доза, количество накоплений).

Пространственное разрешение канала регистрации определялось использованием рентгеновских мишен. Была получена экспериментальная частотно-контрастная характеристика (рис. 2).

Измерение контрастной чувствительности томографа проводилось с помощью 5-миллиметровой циркониевой пластины с четырьмя нанесенными на нее канавками разной глубины при времени экспозиции 2,5 с. В табл. 1 приве-

Таблица 1

| Область измерений      | Амплитуда сигнала | СКО шума |
|------------------------|-------------------|----------|
| Поле без канавок (фон) | 0                 | 240      |
| Канавка 2 (200 мкм)    | 3500              | 284      |
| Канавка 3 (100)        | 1000              | 286      |
| Канавка 4 (50)         | 600               | 303      |

Таблица 2

| Номер образца | Данные рентгенографического контроля ЦЭЛ завода | Результаты томографического контроля |
|---------------|---|--------------------------------------|
| 411267        | Пора 0,2 мм                                     | 3 поры                               |
| 416323        | Скопление пор до 0,3 мм                         | 7 пор                                |
| 416337        | Скопление пор до 0,4 мм                         | Непровар, множество пор              |

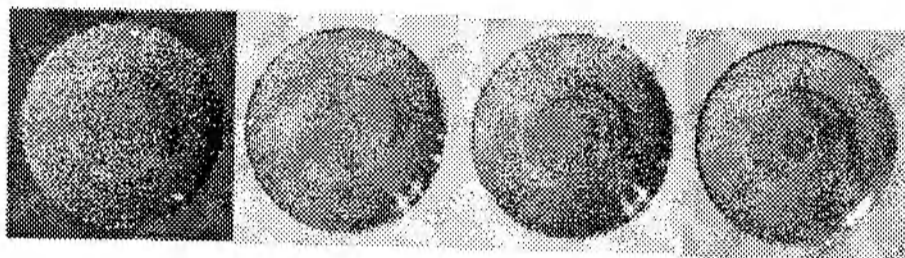


Рис. 3

дены измеренные значения средней амплитуды сигнала и среднеквадратичного отклонения (СКО) шума, выраженные в дискретах АЦП.

Из табл. 1 видно, что сигнал от канавки 4 почти вдвое превышает СКО шума, из чего следует, что чувствительность канала регистрации не хуже 1 %.

Программа испытаний предусматривала получение томографических изображений реальных изделий. Анализ полученных изображений показал способность томографа обнаруживать поры диаметром 100 мкм. В табл. 2 приведены сравнительные результаты заводского и томографического контроля трех изделий.

На рис. 3 приведен вид реконструированных сечений ТВЭЛ 416337, прошедшего заводской контроль.

В задачах контроля зачастую нет необходимости в полной реконструкции сечения, достаточно только определить наличие или отсутствие дефектов, причем зона интереса представляет собой тонкую цилиндрическую область. Это дает возможность использовать панорамную томографию, при которой обеспечивается наглядность представления информации и более высокая производительность контроля.

Проверка чувствительности к локальным дефектам в панорамном режиме проводилась с помощью образца ТВЭЛ с канавками длиной 5 мм, нанесенными на наружной поверхности вдоль оси изделия путем лазерной гравировки. Размеры канавок даны в табл. 3.

Таблица 3

| Номер канавки | Ширина (мкм) | Глубина (мкм) |
|---------------|--------------|---------------|
| 1             | 340          | 280           |
| 2             | 210          | 200           |
| 3             | 170          | 100           |
| 4             | 120          | 70            |
| 5             | 70           | 50            |

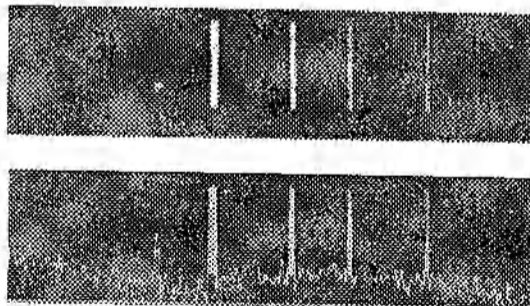


Рис. 4

Т а б л и ц а 4

| Область измерений   | Амплитуда | СКО шума |
|---------------------|-----------|----------|
| Канавка 1 (280 мкм) | 39000     | 3900     |
| Канавка 2 (200)     | 30000     | 4200     |
| Канавка 3 (100)     | 17000     | 3700     |
| Канавка 4 (70)      | 10000     | 3400     |
| Канавка 5 (50)      | 3000      | 3900     |

Панорамное изображение образца приведено на рис. 4. На верхнем изображении видны все пять канавок и внутренний дефект (пора) диаметром 200 мкм, на нижнем — то же изображение с наложенным профилем сигнала. На профиле видны: 1) низкочастотная составляющая, которая определяется биениями ТВЭЛ, наплывами на шве и рядом других факторов; 2) высокочастотная составляющая, представляющая собой реализацию шума канала регистрации; 3) пики сигнала, являющиеся откликами канала регистрации на наличие поры и канавок.

Низкочастотная составляющая может быть скомпенсирована методами цифровой обработки сигналов, поэтому при определении отношения сигнал/шум ее можно не учитывать. Измеренные значения шума и сигнала представлены в табл. 4. Из таблицы видно, что амплитуда сигнала от канавки 100 мкм более чем в 4 раза превышает СКО шума, что делает возможным автоматическое обнаружение.

Кроме того, в процессе испытаний получены панорамные изображения изделий, отбракованных при заводском технологическом контроле. На рис. 5 представлены панорамы изделий с порами, а на рис. 6 — с непроварами шва, который на изображении имеет вид тонкой горизонтальной линии. Время получения одного изображения 42 с.

В заключение приведем основные характеристики томографа: число сечений, получаемых за одну установку, до 32; разрешающая способность (10 % MTF) 5 лин./мм; контрастная чувствительность 1 %; разрядность АЦП 12 разрядов; число отсчетов в проекции 256.

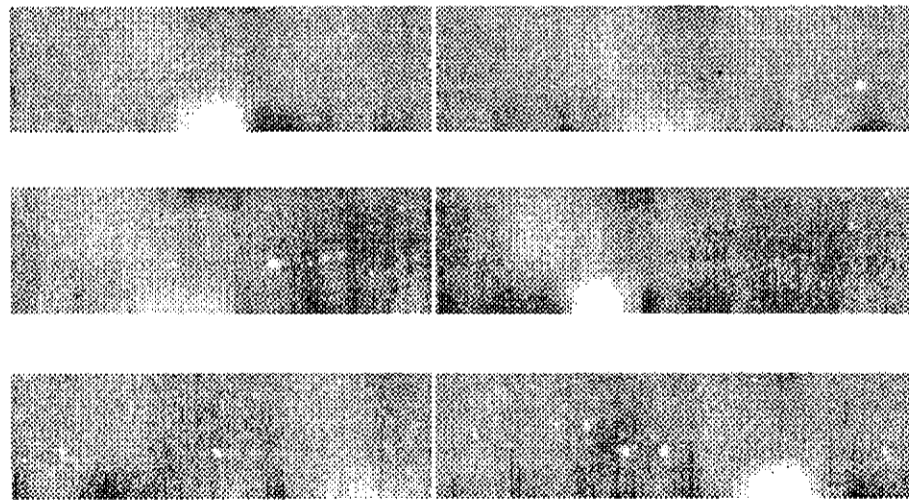


Рис. 5

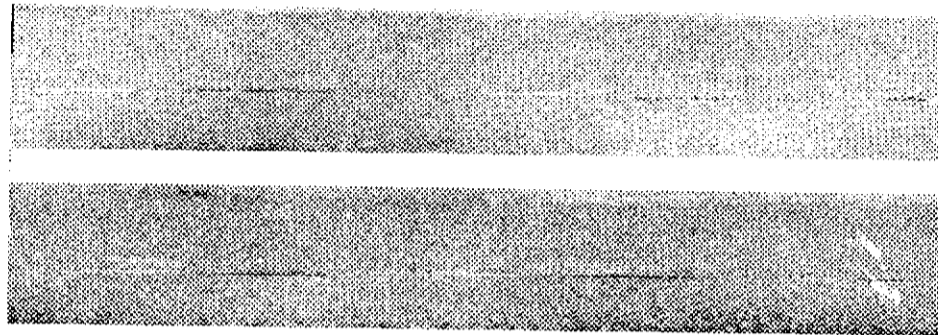


Рис. 6

Параметры томографа позволяют сделать вывод о том, что его использование в заводских условиях дает возможность автоматизировать процесс, повысить оперативность и достоверность контроля ТВЭЛ в процессе их производства. Расчеты и эксперименты, выполненные на томографе, свидетельствуют о возможности обнаруживать дефекты размером до 60 мкм при повышении энергии излучения до 150 кэВ.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Неразрушающий контроль и диагностика: Справочник /Под ред. В. В. Клюева. М.: Машиностроение, 1995.
2. Кузелев Н. Р., Тутубалин В. Н., Салакатова Л. С. Точностные характеристики радиационной компьютерной томографии при контроле стержневых твэлов // Дефектоскопия. 1986. № 7.
3. Васильев Э. Ю., Косарев Л. И., Кузелев Н. Р. и др. Радиационная компьютерная томография шаровых твэлов // Атомная энергия. 1984. № 56. Вып. 6.
4. Вайнберг Э. И., Гончаров В. И., Казак И. А., Курозаев В. П. Чувствительность рентгеновской вычислительной томографии при контроле изделий с локальными дефектами // Дефектоскопия. 1980. № 10. С. 14.

Поступила в редакцию 20 мая 1997 г.