

УДК 620.179.15;621.396.965.8

**МЕТОДЫ РЕШЕНИЯ РЕКОНСТРУКТИВНЫХ  
ЗАДАЧ РАДИАЦИОННОГО КОНТРОЛЯ  
НА ОСНОВЕ «НЕЛИНЕЙНОГО ТОМОСИНТЕЗА»**В.А. Баранов, У. Эwert\*, Е.С. Учайкина,  
Ю.Г. СвинолуповТомский политехнический университет  
\*Bundesanstalt für Materialforschung und prüfung,  
г. Берлин, Германия  
E-mail: ram1@mail.tomsknet.ru

**Баранов Владимир Александрович**, канд. техн. наук, ст. науч. сотр. международной научно-образовательной лаборатории радиационного контроля и диагностики кафедры физических методов и приборов контроля качества Института неразрушающего контроля Томского политехнического университета.

E-mail: ram1@mail.tomsknet.ru  
Область научных интересов: квантовая теория твердых тел, материаловедение, теория решения обратных задач, реконструктивная вычислительная диагностика, вычислительная томография, обработка изображений, радиационный контроль.

**Эwert Уве** Dr. rer. Nat., директор-профессор подразделения 8.3 Радиология института Bundesanstalt für Materialforschung und prüfung, г. Берлин, Германия.

E-mail: uwe.ewert@bam.de  
Область научных интересов: радиационный контроль, материаловедение реконструктивная вычислительная диагностика, вычислительная томография, обработка изображений и теория решения обратных задач.

Рассмотрены методы нелинейного томосинтеза, основанные на оценках нелинейного обратного проецирования, пригодные для решения задач малоракурсной томографии. Проведено их сравнение с классическими методами обратного проецирования. Приведены примеры реконструкции и математического моделирования. Перечислены сферы успешного применения нелинейного томосинтеза. Отмечены преимущества оценок нелинейного обратного проецирования над линейными при решении остро некорректных реконструктивных задач.

**Ключевые слова:**

Обратная задача, некорректная задача, нелинейное обратное проецирование, обработка изображений, пространственная фильтрация

**Методы нелинейного обратного проецирования**

В настоящее время усилился интерес исследователей к нелинейным статистическим методам решения реконструктивных задач, которые в своей изначальной постановке являются линейными и детерминистскими [1–10]. Среди факторов, обуславливающих данную тенденцию, необходимо отметить следующие: 1) нелинейные оценки решений интегральных проекционных уравнений, как правило, значительно более точны, чем линейные, и могут быть получены без дополнительных вычислительных затрат; 2) они работоспособны при восстановлении

изображений по неполным данным, в то время как для многих практически важных задач данного класса подходы, основанные на линейных оценках, непригодны в принципе; 3) априорная информация о восстанавливаемом объекте естественным образом учитывается в форме нелинейных статистических ограничений на решение; 4) статистический подход позволяет разрабатывать «мягкие» математические модели, преодолевая тем самым «жесткость» детерминистских методов, в которых опытные данные и лежащие в основе решения задачи гипотезы часто оказываются несовместными; 5) статистические методы более, чем детерминистские, пригодны для решения синтетических задач, поскольку в них имеются пригодные для этой цели формальные процедуры («решающие правила», «решающие функции» и т. п.).

**Учайкина Елена Сергеевна**, аспирант, инженер международной научно-образовательной лаборатории радиационного контроля и диагностики кафедры физических методов и приборов контроля качества Института неразрушающего контроля Томского политехнического университета.

E-mail: [uchaikina2@mail.ru](mailto:uchaikina2@mail.ru)  
Область научных интересов: обработка изображений, вычислительная диагностика, квантовые компьютеры, программирование.

**Свинолулов Юрий Григорьевич**, канд. техн. наук, зам. генерального директора ОАО «Манотомь», г. Томск.

E-mail: [sjg@manotom-tmz.ru](mailto:sjg@manotom-tmz.ru)  
Область научных интересов: квантовая теория твердых тел, материаловедение, теория решения обратных задач, реконструктивная вычислительная диагностика, вычислительная томография, обработка изображений, радиационный контроль.

Среди методов этого класса наиболее последовательными и концептуально безупречными являются методы, основанные на вариационных принципах статистики (максимума энтропии [10], максимального правдоподобия и др.), однако сфера их применимости достаточно ограничена прежде всего благодаря отсутствию гибкости в учете специфики объекта контроля, что приводит к известной «бедности» синтезированных изображений конкретным содержанием, а иногда и к грубым артефактам. Отмеченные недостатки в значительной степени преодолены в рамках «структурно-ориентированного» подхода [9] к исследованию и реконструкции объектов. Разработанные ранее методы нелинейного обратного проецирования [1–7] оказались тесно связанными с ним как идеологически, так и технически. «Математическая техника» нелинейного обратного проецирования активно используется в нем для конструирования «мер сходства» и «мер различия» как неклассических статистик [8, 9].

Концепция обратного проецирования является одной из старейших и, в то же время, одной из наиболее жизнеспособных в томографии.

Функция  $t(x, y, z)$ , описывающая внутреннее строение объекта исследования, должна быть решением системы  $N$  интегральных проекционных уравнений. Луч-суммы  $P_n(x, y, z)$ , инцидентные точке  $(x, y, z)$  объекта контроля, определены во всем объекте, хотя и измеряются на какой-то «плоскости регистрации». (Здесь  $N$  – число ракурсов, а  $n$  – номер ракурса). Базовой оценкой для  $t(x, y, z)$  в классическом методе обратных проекций является линейное усреднение (т. е. среднеарифметическое):

$$T(x, y, z) = (P_1 + P_2 + \dots + P_N) / N. \quad (1)$$

Характерно, что, несмотря на обилие новых реконструктивных алгоритмов, наиболее часто употребляемые среди них – это модификации метода обратных проекций, осуществляемые путем внесения в этот базовый

«суммационный» алгоритм (1) различных процедур фильтрации – предобработки проекций и постобработки томограмм (таких, например, как «метод обратных проекций с фильтрацией сверткой» и пр.). В рамках этих модификаций относительно легко могут быть решены проблемы с «некорректностью» задачи реконструкции путем специальной фильтрации с учетом особенностей типичного объекта контроля. К сожалению, этим путем преодолевается лишь «слабая некорректность» и такого рода методы применимы лишь для решения многокурсовых задач.

В работах [1, 6, 4] была осуществлена более радикальная модификация классического обратного проецирования за счет смены самой базовой оценки на нелинейную

$$T(x, y, z) = f(P_1, P_2, \dots, P_N), \quad (2)$$

где функция  $f$  инвариантна относительно любых перестановок своих неотрицательных аргументов.

Дальнейшее совершенствование методов (2) нелинейного обратного проецирования достигается за счет процедур предобработки и постобработки, т. е. как и в случае (1) базовая оценка (2) «обрастает» техникой фильтрации. Для этой цели систематически используются структурно-ориентированные (т. е. теоретико-групповые статистические) методы обработки изображений [9]. В отличие от модификаций (1) методы нелинейного обратного проецирования

(НЛОП) пригодны для решения остро некорректных задач, в частности они вполне адекватны для решения задач малоракурсной томографии.

С математической точки зрения методы НЛОП уже хорошо изучены [4, 6]. В частности, показано, что метод минимальных проекций (частный случай (2) с использованием в качестве  $f$  первой порядковой статистики) является решением задачи минимизации с ограничениями для норм невязок на классе нелинейных усреднений. Проведено сравнение классического обратного проецирования с методом минимальных проекций. Выявлены связи между методами НЛОП и известными методами ПНВМ (проекции на выпуклые множества) [11]. Разработаны итерационные алгоритмы НЛОП.

К настоящему моменту на основе этих методов (известных также как методы «нелинейного томосинтеза») решен ряд актуальных задач неразрушающего контроля. Перечислим некоторые из них:

1. контроль крупногабаритных изделий (деталей машин, компонентов авиационной и космической техники и т. п.) с использованием малогабаритных бетатронов и линейных ускорителей в качестве источников излучений;
2. контроль микросхем и других изделий микроэлектроники;
3. контроль компонентов ядерных реакторов и атомных электростанций в действии (в особенности томографическая визуализация трещин в работающих компонентах);
4. диагностика сварных швов;
5. контроль строительных конструкций (в частности, железобетонных стен толщиной до 0,6 м)
6. контроль багажа на транспорте в условиях террористической угрозы;
7. решение некоторых задач обработки изображений в криминалистике;
8. томографическое исследование произведений искусства и памятников архитектуры.

Поскольку данный класс реконструктивных методов пока еще недостаточно полно представлен в литературе, задачей этой короткой статьи является дать о нем самое общее представление и проиллюстрировать некоторыми примерами.

### Типичные оценки нелинейного обратного проецирования

Оценки НЛОП могут быть как аналитическими, так и статистическими. Наиболее употребителен статистический подход, так что функция (2) может рассматриваться как некоторая статистика – функция случайной выборки ( $P_1, P_2, \dots, P_N$ ). Например, оценка (1) есть просто частный случай (2) – линейное усреднение. Еще один важный (существенно нелинейный) частный случай (2)

$$T = T\{x, y, z\} = \min(P_1, P_2, \dots, P_N) \quad (3)$$

– оценка НЛОП, широко используемая в «методе минимальных проекций» [1, 4, 6]. Одна из основных предпосылок концепции нелинейного обратного проецирования заключается в том, что (2) в действительности представляет собой некоторое нелинейное усреднение, используемое вместо (1) и, таким образом, большое значение имеет класс оценок из подмножества (2), определяемого ограничениями

$$\min(P_1, P_2, \dots, P_N) \leq f \leq \max(P_1, P_2, \dots, P_N).$$

С теоретической точки зрения важны два типа оценок НЛОП: 1) порядковые статистики

$$f = S_k(P_1, P_2, \dots, P_N) \quad (4)$$

(например, медиана, в случае  $k = N/2$  или  $(N+1)/2$ , или оценка по методу минимальных проекций [7], в случае  $k = 1$ ) и 2) нелинейные усреднения вида

$$F(f) = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N F(P_n), \quad (5)$$

где  $F(P)$  в (5) – монотонная, неотрицательная функция, так что нелинейное уравнение (5) разрешимо относительно  $f$  и существует обратное преобразование  $F^{-1}$  (например,  $f$  есть среднее геометрическое при  $F(P) = \ln P$ , среднее геометрическое при  $F(P) = 1/P$  и т. д.).

### Классические и «нетрадиционные» схемы регистрации проекционных данных в цифровом томосинтезе

При решении задачи трехмерной реконструкции схема регистрации проекций чаще всего выбирается такой же, как в классическом томосинтезе.

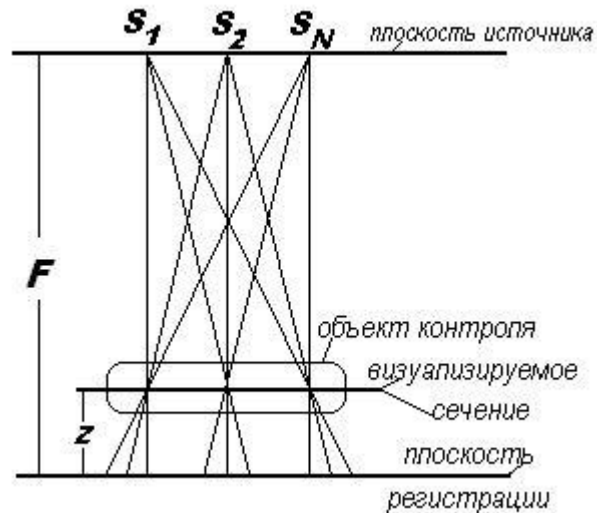


Рис. 1. Регистрация проекций в классическом томосинтезе

На рис. 1. приведена типичная схема регистрации проекций в томосинтезе с «копланарной» геометрией, хорошо приспособленной для последующей «последлой визуализации» объекта контроля, в силу чего томосинтез довольно часто называется также «ламинографией» [5], что нередко дает повод считать копланарность одним из основных признаков томосинтеза. Тем не менее цифровой томосинтез вовсе не привязан жестко к такой геометрии и, в принципе, визуализируемыми сечениями могут быть любые поверхности, проходящие через объект контроля.

В классической копланарной геометрии объект контроля предполагается расположенным между плоскостью источников и плоскостью регистрации, которые параллельны друг другу. Ось  $z$  в этом случае считается перпендикулярной плоскости регистрации и, таким образом,  $x, y$  – координаты на плоскости. Начало координат находится на плоскости регистрации ( $z = 0$ ).  $N$  фиксированных положений источника излучения на плоскости источника ( $z = F$ , где  $F$  – фокусное расстояние) соответствуют  $N$  проекциям на плоскости регистрации. Положение произвольного сечения объекта определяется параметром  $z$  ( $z < F$ ) – «глубиной залегания».

При решении задач нелинейного томосинтеза удобным приемом является редуцирование путем несложных преобразований некомпланарной геометрии исходной задачи в компланарную. Например, некомпланарной (рис. 2) является геометрия регистрации проекций при контроле заполненных теплоносителем трубопроводов на атомных электростанциях [8]. При преобразовании схемы регистрации в копланарную в роли визуализируемых сечений выступают развертки цилиндра. Разные ракурсы получаются за счет сдвига источника излучения вдоль оси вращения трубы.

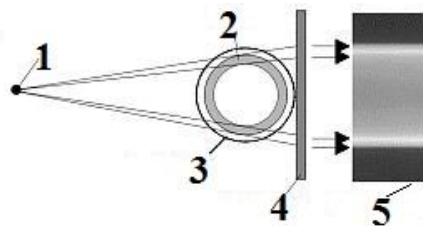


Рис. 2. Регистрация проекционных данных для томосинтеза (сканирование трубы): 1) источник рентгеновского излучения; 2) труба; 3) изоляция; 4) детектор; 5) радиографическое изображение

При этом параметр «глубины залегания сечения» меняется в пределах от внутреннего радиуса трубы до ее внешнего радиуса. При регистрации проекционных данных (рис. 2) сканер вращается вокруг трубы.

### Сравнение эффективности оценок классического и нелинейного томосинтеза путем математического моделирования

Некоторое представление о возможностях томосинтеза с оценками НЛОП можно получить, рассматривая следующий пример послойного восстановления по двумерным проекциям. На рис. 3 представлены результаты численного моделирования для томосинтеза. Объект контроля (математически сгенерированный фантом) состоит из 8 параллельных друг другу плоских слоев. Информационным содержанием отдельного слоя является изображение буквы из набора А, В, С, ..., Н. На рис. 3, а показаны четыре «тенеграммы» – результаты «просвечивания» объекта контроля с четырех позиций. На рис. 3, б представлены результаты восстановления для двух слоев по четырем проекциям. Слева – по классическому методу обратных проекций (1). Справа – по методу минимальных проекций (3). На рис. 3, в представлены результаты восстановления для тех же самых слоев по 8 проекциям (помехи отсутствуют). На рис. 3, г можно видеть результаты восстановления для двух других слоев объекта по 4 проекциям.

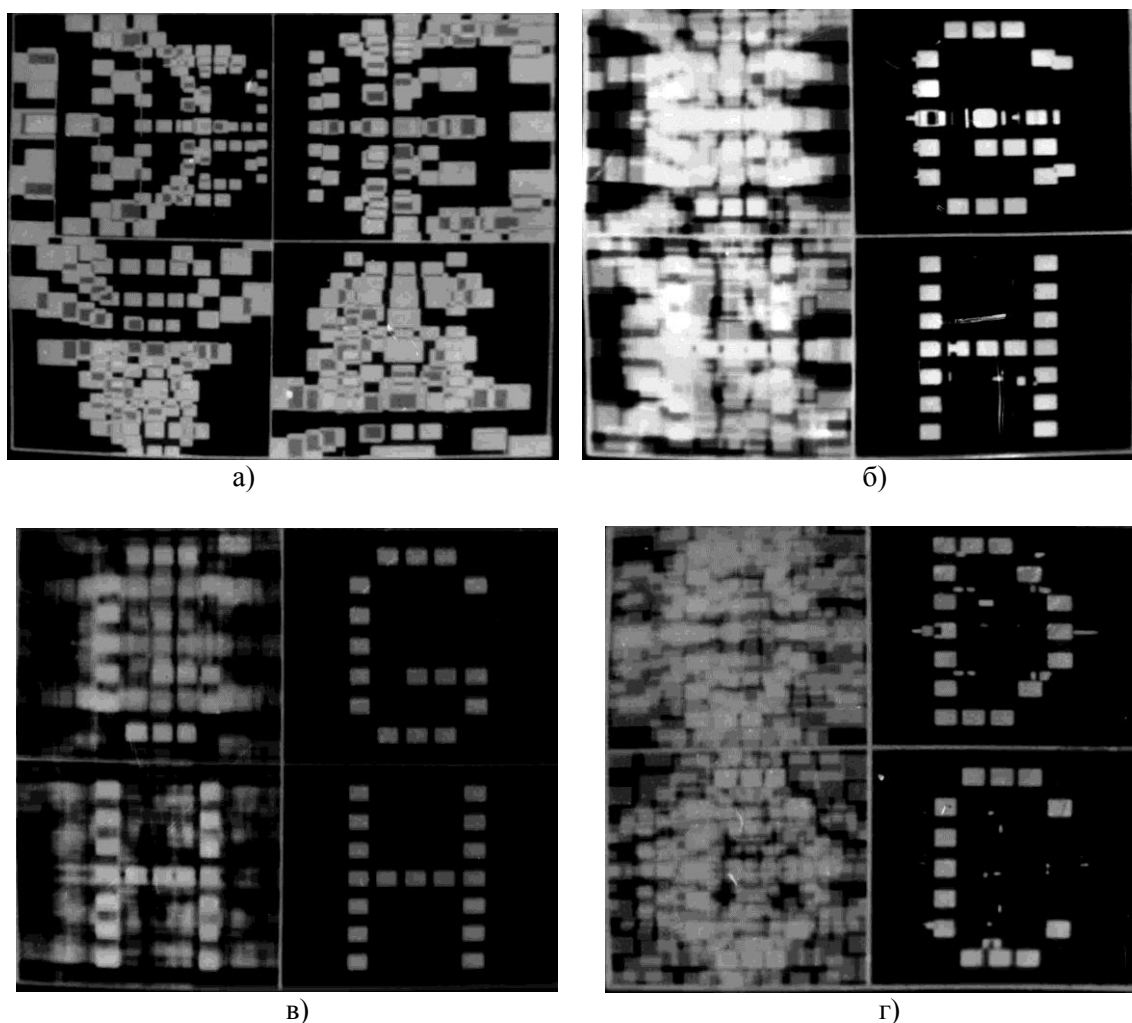
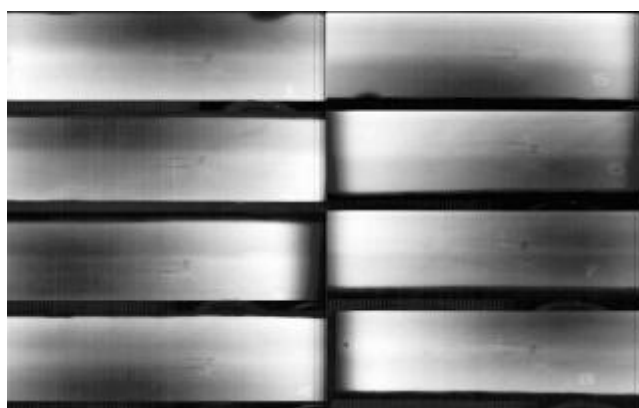


Рис. 3. Сравнение классического метода обратных проекций с методом минимальных проекций

**«Бетатронная томография» на основе методов нелинейного томосинтеза**

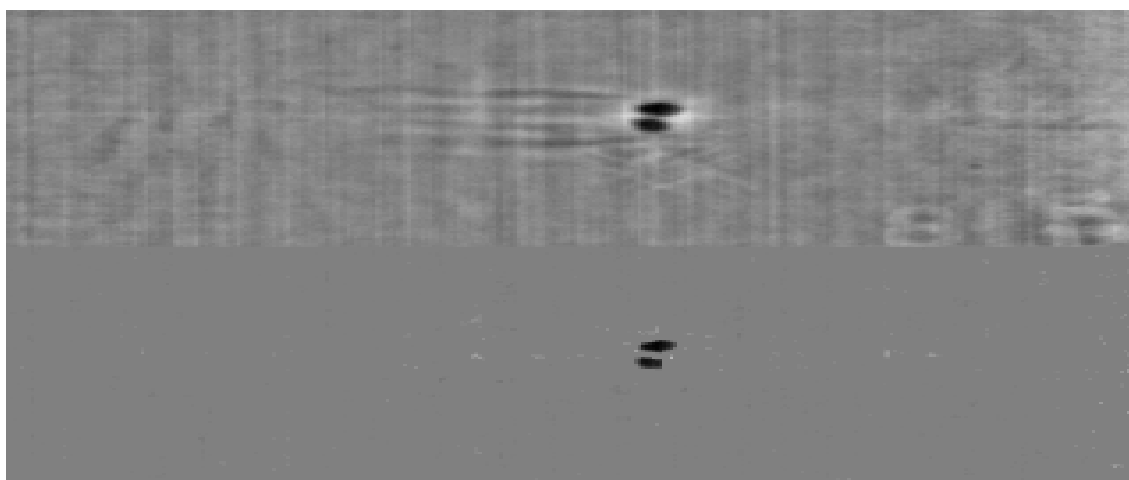
В предыдущем примере проекционные данные незашумлены. Для иллюстрации возможностей нелинейного томосинтеза при работе с реальными зашумленными данными рассмотрим пример послойной визуализации стального слитка (после обработки на обжимном стане) размерами 250×120×60 мм. (Эксперимент был подготовлен и осуществлен совместно с коллегами из Фраунгоферовского института IzfP, Саарбрюккен, Германия).

Объект контроля просвечивался малогабаритным бетатроном МИБ-6, и проекции регистрировались на рентгеновской пленке. Каждая из проекций соответствует определенному положению объекта на поворотном столе. Шаг угла поворота равен 45°. (Кассета с пленкой поворачивалась вместе с объектом). Фокусное расстояние равно 890 мм, расстояние от источника излучения до оси вращения – 250 мм. Проекционные изображения на пленках оцифровывались при помощи автоматического микроденситометра. На рис. 4 представлены 8 нефильтрованных радиографических проекций объекта.

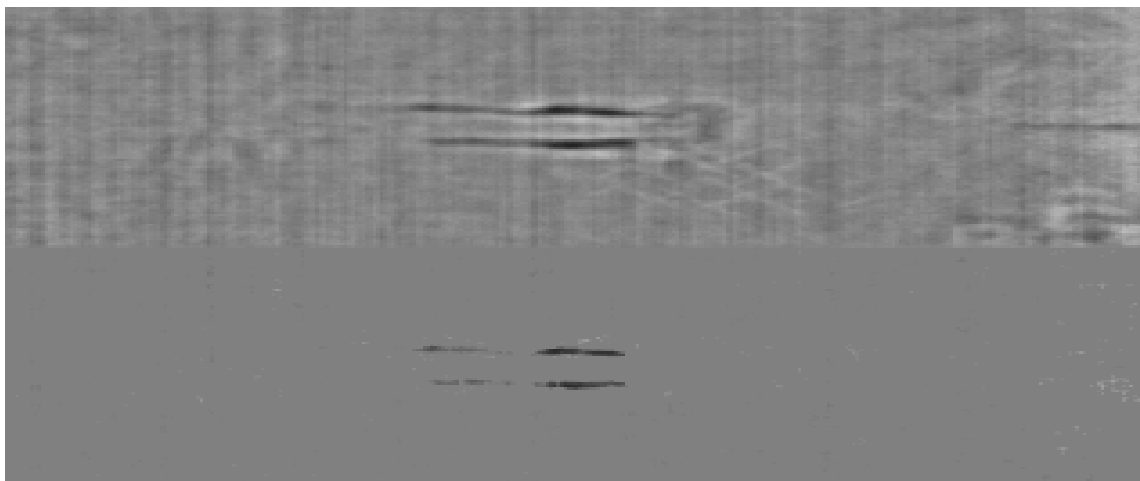


**Рис. 4.** Радиографические проекции стального слитка

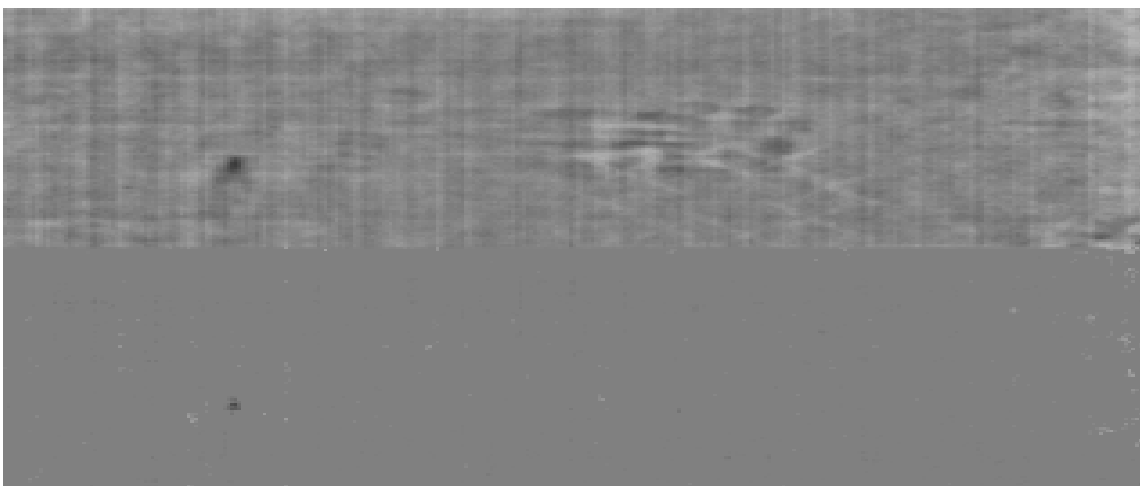
На рис. 5–7 представлены 3 томограммы объекта, синтезированные по набору из 8 фильтрованных проекций (использовался вариант локально-линейной фильтрации) двумя способами. Вверху – по классическому методу обратных проекций. Внизу – по одному из вариантов нелинейного обратного проецирования. (В этом случае в качестве оценки НЛОП использовался аналог 2-й порядковой статистики (4), точнее, из 8 луч-сумм выбиралась 2-я по близости к низкочастотному «тренду» соответствующей проекции). На всех томограммах видны пустоты в куске стали на соответствующей глубине залегания.



**Рис. 5.** Томограммы для слоя с глубиной залегания  $Z = 0,34$



**Рис. 6.** Томограммы для слоя с глубиной залегания  $Z = 0,61$



**Рис. 7.** Томограммы для слоя с глубиной залегания  $Z = 0,85$

Томограммам на рис. 5–7 соответствуют глубины залеганий  $Z = 0,34, 0,61$  и  $0,85$ , которые даны в относительных единицах ( $Z = 0,0$  соответствует метке на нижней стороне объекта и  $Z = 1,0$  – на верхней).

Сравнение результатов, полученных двумя методами, позволяет оценить преимущества НЛОП. Синтез по классическому методу обратных проекций дает большое количество артефактов (превосходящих по амплитуде полезный сигнал), что не обеспечивает надежную диагностику. Синтез по методу НЛОП с соответствующим типом фильтрации и выбором параметров оценок НЛОП позволяет сразу же отсеять большой объем ненужной информации (в частности, информацию о низкочастотной составляющей проекций) и радикально упростить ситуацию, не нарушая структуры дефектов.

Фактически, томограммы по методу НЛОП представляют собой «карты дефектности». Они точны, хотя и упрощены. Если бы в дополнение к ним была проведена еще реконструкция объекта по полному (т. е. 100–200) набору проекций в лабораторных условиях, скажем, по алгоритму Feldkamp, она не обеспечила бы дефектоскописту нового знания об объекте контроля (знания, а не информации). Поскольку такая реконструкция была бы перегружена «пустой» (не нагруженной смыслом) информацией, затрудняющей выбор правильных решений, то потребовалось бы дополнительная работа по ее редуцированию в приемлемую форму. Проблема редуцирования данных на начальном этапе реконструкции является весьма актуальной в современной томографии.

### Основные результаты и выводы

Метод обратного проецирования был и остается концептуально привлекательным для томографической 3D-реконструкции. Среди его достоинств – возможность визуализировать каждое отдельное сечение объекта контроля независимо от остальных, как и в классическом томосинтезе. Попытки улучшить классический алгоритм в его цифровых реализациях за счет линейной фильтрации приводят к успеху только при большом числе ракурсов (сотни) и только при «слабой некорректности». Для того чтобы сделать метод работоспособным при малом (4–8) числе ракурсов необходимо использовать оценки нелинейного обратного проецирования. Дальнейшее усовершенствование метода требует вовлечения в алгоритм нелинейной фильтрации, основанной на структурно-ориентированном подходе к обработке изображений.

*Авторы выражают благодарность проф. В. Моргнеру (Людвигсхаген, Германия), Д-ру У. Шерпелю (Берлин, Германия) и коллегам по НИИ НК (Томск) В.А. Касьянову и В.В. Романову за помощь в экспериментальной части работы, а также проф. Х.-М. Кренингу (Саарбрюккен, Германия) за поддержку данного научного направления.*

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Баранов В.А., Чекалин А.С. Система цифрового томосинтеза для неразрушающего контроля // Дефектоскопия. – 1988. – № 5. – С. 30–36.
2. Baranov V., Chakhlov V., Kröning M., Morgner W. High speed computerized tomography on thick-walled steel and concrete components using a portable 6 MeV betatron // 6<sup>th</sup> European Conference on Non-destructive testing: Collect. of papers. – Nice, France, 1994. – № 2. – P. 1287–1291.
3. Baranov V.A., Temnik A.K., Chakhlov V.L., Chekalin A.S. Betatron tomography with the use of nonlinear backprojection techniques // International Symposium on Computerized Tomography for Industrial Applications: Collect. of papers. – Berlin, 1994. – P. 271–277.
4. Baranov V.A. Convex projections reconstruction algorithms on the basis of non-linear backprojection approach // International Symposium on Computerized Tomography for Industrial Applications: Collect. of papers. – Berlin, 1994. – P. 88–95.
5. Ewert U., Schumm A., Nockeman C., Baranov V.A. Fortschritte auf dem Gebiet der digitalen Laminographie // Deutsche Gesellschaft für Zerstörungsfreie Prüfung e.V., Jahrestagung 1995 (100 Jahre Röntgenstrahlen und die heutige Vielfalt Industrieller ZfP-Praxis), Aachen. – 1995. – S. 471–475.
6. Baranov V.A. A Variational Approach to Non-Linear Backprojection // Computerized Tomography: Collect. of papers / Editor-in-Chief: M.M. Lavrent'ev. – Utrecht, Netherlands, 1995. – P. 82–97.
7. Ewert U., Baranov V., Borchard K. Cross-sectional imaging of building elements by new non-linear tomosynthesis technique using imaging plates and Co<sup>60</sup> radiation // NDT & E International, Elsevier Science Ltd. – 1997. – V. 30. – № 4. – P. 243–248.
8. Баранов В.А., Бразовский В.В., Эверт У., Редмер Б. Структурно-ориентированная визуализация зон образования трещин в компонентах атомных электростанций // Естественные и технические науки. – 2010. – № 5. – С. 386–391.
9. Баранов В.А., Бразовский В.В., Ивженко О.О., Эверт У. Структурно-ориентированный подход к обработке изображений // Естественные и технические науки. – 2010. – № 5. – С. 407–413.
10. Wernecke S.J., D'Addario L.R. Maximum entropy image restoration // IEEE Trans. on Computers. – 1977. – V. C-26. – № 4. – С. 351–364.
11. Youla D.C. Generalized Image Restoration by the Method of Alternative Orthogonal Projections // IEEE Trans. on Circuits and Systems. – 1978. – V. CAS-25. – № 9. – С. 694–702.

Поступила 15.12.2011 г.