

Секция
АВТОМАТИЗИРОВАННЫЕ МЕТОДЫ
ОБРАБОТКИ РЕЗУЛЬТАТОВ НЕРАЗРУШАЮЩЕГО КОНТРОЛЯ

ТОМОГРАФИЧЕСКАЯ ВИЗУАЛИЗАЦИЯ ЗОН ОБРАЗОВАНИЯ ТРЕЩИН
В КОМПОНЕНТАХ АТОМНЫХ ЭЛЕКТРОСТАНЦИЙ

В.А. Баранов (НИИ ИН ТПУ)

У. Эверт, Б. Редмер

(Bundesanstalt für Materialforschung und – prüfung (BAM), Германия, Берлин)

В статье рассмотрены методы визуализации зон образования трещин в компонентах АЭС в процессе их работы. Подробно исследована проблема обнаружения трещин в сварных швах трубопроводов АЭС, наполненных теплоносителями. Изложен экспериментальный метод регистрации проекционных изображений участков трубопроводов с использованием вращающегося сканера и высокочувствительной радиометрической камеры. Рассмотрен статистический теоретико-групповой подход к фильтрации проекций и на его основе предложены конкретные структурно-ориентированные алгоритмы распознавания элементов формирующейся трещины. Исследованы возможности и ограничения томографической визуализации трещин. Методы нелинейного томосинтеза со структурно-ориентированной предобработкой проекций применены для синтеза томограмм формирующейся трещины и ее объемного представления. Нелинейный структурно-ориентированный подход к диагностике «дефектов» и других «смысловых элементов» на проекционных изображениях оценивается как перспективный и к настоящему моменту не имеющий аналогов в математической интроскопии.

Проблемы безопасности эксплуатации атомных электростанций (АЭС) стоят в современном мире весьма остро. Некоторые из радикально настроенных лидеров «зеленого движения», особенно в Германии, требуют даже полного искоренения ядерной энергетики. С учетом приближающегося энергетического кризиса такая постановка вопроса, не выглядит сколько-нибудь реалистичной. Нефть кончается и человечество нуждается в альтернативных источниках энергии. К сожалению, поиск существенно новых решений, основанных на достижениях современной теоретической физики, в наше время не стимулируется, а внимание переключается на использование энергии ветра, приливов, гейзеров и т. п. Широко разрекламированная «водородная энергетика» никакой энергетической проблемы конечно не решает. Электролитическая диссоциация воды требует, как минимум, в полтора-два раза больше энергии, чем дает обратная реакция горения водорода. Речь может идти только лишь о «водородной расфасовке» энергии с целью сохранения в более или менее привычном виде идола современной цивилизации – автомобиля и традиционной автомобильной индустрии. Предполагаемая экологическая безопасность «водородного автомобиля» сомнительна т. к. водород не сжигается и необходимы баллоны высокого давления. Для обычного пробега в несколько сотен километров давление должно быть порядка 600–800 атмосфер. Пока непонятно, как будет вести себя такая техника при неизбежных «ДТП» (дорожно-транспортных происшествиях). Но, самое главное, поскольку автомобили потребляют энергетических ресурсов в два раза больше чем вырабатывают все электростанции ми-

ра, для нормального функционирования «водородной энергетики» необходим ввод в действие новых электростанций, суммарная мощность которых должна в четыре раза (!) превысить уже существующую. И работать они должны, конечно же, не на продуктах переработки нефти и не на «энергии ветра».

В условиях конца «нефтяной эры» в энергетике и поиска альтернативных источников энергии роль традиционных АЭС только возрастает. Следует отметить, что распространенные представления о повышенной опасности радиоактивного заражения окружающей среды при работе АЭС не соответствуют действительности. Например, угольные электростанции в результате выброса в атмосферу радиоактивного изотопа ^{238}U загрязняют ее в большей степени. Тем не менее, АЭС становится чрезвычайно опасным объектом в условиях «нештатного» функционирования при приближении к катастрофическим режимам. Недопустимость такого рода ситуаций требует разработки современных технологий контроля и мониторинга компонент АЭС в процессе их функционирования [8]. Это комплексная проблема, которую можно условно разделить на ряд «подзадач» разной степени сложности, большинство из которых должны решаться методами неразрушающего контроля (НК). Однако, для полного решения проблемы последних достижений НК все еще недостаточно, поэтому требуется разработка новых подходов, и современной концепции контроля. [6, 12]. Развитие математических методов решения обратных «некорректно-поставленных» задач, появление эффективных алгоритмов обработки результатов измерений, массовая компьютеризация, равно как и требования практики создали в неразрушающем контроле новую идеологическую атмосферу, в которой системы контроля все в большей степени приобретают облик систем *вычислительной диагностики* (ВД) и информационных технологий (ИТ). В наше время система ВД осознается как *диагностическая реконструктивная система* для решения на практике определенной «некорректной задачи», иными словами для восстановления целостной структуры объекта контроля по косвенным измерениям его характеристик. ВД это не обязательно вычислительная томография (ВТ), хотя прецедент возникновения ВТ имел большое значение для становления ВД. Диагностическая система включает в себя также средства интерпретации результатов восстановления т. е. их «перевода» на язык образного человеческого восприятия. [12]. В ее функции может входить также автоматическое принятие решений (например, при мониторинге АЭС или же при отбраковке изделий в режиме поточного (on-line) контроля). Томографическая диагностика для НК во многих существенных аспектах отличается от ВТ для медицины. Ведь с точки зрения рентгенологии физическое тело человека представляют собой объект хорошо изученный и стандартизованный, тогда как объекты НК резко различаются по размерам, формам, плотности, статистическим, спектральным и др. характеристикам. Доступность объекта НК при сборе проекционных данных как правило ограничена, а сами проекции сильно зашумлены. Поэтому невозможно и создание «универсального» томографа для НК. Для повышения эффективности систем ВД необходима их диверсификация и специализация на единой идеологической основе.

В течение ряда лет усилия авторов (как в НИИ ИН, Томск так и в «БАМ»е, Берлин) были направлены на создание методов ВД, пригодных для широкого применения в НК, для разработки экономически малозатратных и эффективных систем томографической визуализации. Этим требованиям вполне удовлетворяет разработанный в НИИ ИН «нелинейный томосинтез». [1–7, 9–12], сохранивший концептуальную привлекательность классического томосинтеза и, в то же время, позволяющий преодолеть его недостатки на основе нелинейного математического подхода к реконструкции изображений по проекциям [7, 5]. Важнейшими преимуществами нелинейного томосинтеза среди других методов визуализации внутренней структуры объектов являются 1) относительная простота аппаратной реализации, 2) низкая «вычислительная

стоимость» (иногда на несколько порядков ниже, чем для традиционных методов) 3) пригодность для работы в реальном времени и on-line режиме, 4) возможность реконструкции предельно зашумленных объектов, 5) возможность точной настройки на топологические особенности объекта, что делает фильтрацию «ориентированной», 6) приспособленность для реконструкции объекта по небольшому набору проекций, 7) мощный аппарат статистической поддержки, позволяющий осуществлять надежное ситуационное распознавание «дефектов» и других «смысловых» элементов изображения. В настоящее время практическое применение нелинейного томосинтеза широко-масштабно [6, 12] и включает такие направления как контроль изделий микроэлектроники, исследование структуры полимерных материалов, диагностику сварных швов, контроль багажа на транспорте в условиях террористической угрозы, решение некоторых задач обработки изображений в криминалистике и т. д. В последнее время эти методы применяются также для исследования состояния произведений искусства и памятников архитектуры. Поскольку сфера приложений нелинейного томосинтеза непрерывно расширяется, любой отбор задач, решенных на его основе, был бы тенденциозным. Тем не менее, можно выделить три области НК, где его применение наиболее оправдано и многократно выверено успешными практическими реализациями: 1) контроль деталей машин и крупногабаритных изделий [2, 12, 6, 3], 2) контроль строительных конструкций [10, 9, 4, 3, 6, 11], 3) «динамический» контроль и мониторинг компонентов непрерывно работающих сложных технических систем (таких, например, как АЭС) в процессе их эксплуатации [12–20].

Одной из важнейших проблем НК в атомной промышленности является контроль трещин в компонентах узлов и агрегатов АЭС в процессе их работы. Реальная трещина, даже в изолированной детали, которую (казалось бы) можно исследовать на стационарном томографе, представляет собой сложный объект, крайне неудобный для томографической визуализации, а ее реконструкция может служить образцом «некорректно-поставленной» задачи, где «некорректность» выступает в своей крайней, гротескной форме. Как известно, трещина, будучи «планарным объектом», видна только лишь под определенными фиксированными углами, и то на пределе разрешения. Вклад в луч-суммы для лучей под другими углами даже предельно точная система измерения проекционных данных разрешить не в состоянии. А если бы такая сверх-точная система существовала, возникли бы непреодолимые трудности с модификацией известных реконструктивных алгоритмов, уже в силу резкого возрастания объема обрабатываемых данных. Строго говоря, такую задачу нельзя считать томографической, поэтому еще совсем недавно многие специалисты резонно полагали, что «трещина это задача для будущих поколений». Тем не менее, уже в конце 90-х гг. в «БАМ»е на основе нелинейного томосинтеза была построена система ВД, давшая первые обнадеживающие результаты в решении этой проблемы [14].

Вопросы математической интроскопии и материаловедения, в частности вопросы визуализации трещин и трещинообразования тесно переплетаются. Формирование трещин происходит в зонах повышенного напряжения, где интенсифицированы такие факторы как вибрация, перепады механических напряжений, температур и пр. Образующиеся трещины имеют определенную предпочтительную ориентацию, например наиболее опасные трещины в сварном шве ориентированы вдоль шва. В изображения «трещин», регистрируемые на рентгеновских проекциях вносят вклад, вообще говоря, множество микротрещин, которые в зоне напряженности пространственно распределены по углам α между их плоскостями и преимущественным направлением ($\alpha = 0$) ориентации этих плоскостей в зоне. Это распределение $W(\alpha)$ повидимому близко к нормальному, по крайней мере в начальной стадии формирования трещины. При радиографическом исследовании сварных швов «трещина» (а на самом деле зона ее

формирования) бывает видна в диапазоне углов α до 10° и выше, что позволяет оценить дисперсию данного распределения. Благодаря такому разбросу «томография» становится уже возможной, поскольку становится доступным набор разноракурсных проекций. Но поскольку на луч-суммах для K различных лучей, занумерованных индексом k ($k = 1, \dots, K$), проходящих через одну и ту же точку зоны, представлены проекционные вклады от микротрещин с разными углами ориентации α_k , не может быть и речи об «индивидуализированной» томографической визуализации отдельной микротрещины и определении ее точного положения. Тем не менее, статистический квазитомографический подход все же осуществим, если сделать предположение о близости распределения микротрещин $w(\alpha)$ в достаточно большом «элементарном объеме» зоны «общему» распределению $W(\alpha)$ в зоне, иначе говоря, о пространственной однородности распределения $w(\alpha)$, его инвариантности по отношению к всевозможным сдвигам в зоне. Если в традиционной рентгеновской ВТ объектом реконструкции является скалярное поле «коэффициента линейного ослабления» $\mu(x, y, z)$, то в данном случае восстанавливаемое поле должно быть представлено в форме $\mu = \mu(x, y, z, \alpha)$ в силу неизотропности. Однако, предположение $w(\alpha) = W(\alpha)$ позволяет осуществить «выравнивание» проекций в интервале углов, где $W(\alpha) \neq 0$ (в интервале статистической устойчивости $W(\alpha)$, вдали от «хвостов» распределения), путем деления луч-сумм на соответствующие значения $W(\alpha)$ и умножения на единый нормировочный множитель λ , что в свою очередь дает возможность свести задачу к реконструкции некоего «эффективного» скалярного поля $\mu_{\text{эф}} = \mu_{\text{эф}}(x, y, z)$, описывающего объемное распределение микротрещин со всевозможными ориентациями в зоне зарождения трещин. При этом луч-суммы «выровненных» проекций являются интегралами от $\mu_{\text{эф}}(x, y, z)$ вдоль лучей. Интегрирование $\mu(x, y, z, \alpha)$ по углам, на основе которого должно получаться $\mu_{\text{эф}}(x, y, z)$, не зависит от x, y, z и также может быть сведено к процедуре «выравнивания». Грубо говоря, величина $\mu_{\text{эф}}\Delta x\Delta y\Delta z$ описывает «количество микротрещин» в объеме $\Delta x\Delta y\Delta z$, при этом размеры $\Delta x, \Delta y, \Delta z$ элементарного объема много больше размеров типичной микротрещины и сравнимы с размерами одного пикселя на проекционном изображении.

Трещина в стадии формирования представляет собой незаметный и крайне зашумленный объект. В тех случаях, когда она хорошо выявляется с использованием традиционных методов фильтрации изображений часто бывает уже поздно. (Контролируемое изделие уже развалилось). На последних стадиях своего развития трещина растет очень быстро, иногда «взрывообразно». Поэтому столь важна разработка методов распознавания образов и обработки изображений, позволяющих контролировать эволюцию трещины на первоначальных, относительно «медленных» этапах ее формирования. Это становится возможным на основе «структурно-ориентированных методов обработки изображений» [10, 9, 19, 20, 14, 13], возникших при развитии нелинейного томосинтеза.

В математике понятие «структура» применяется к множествам, природа элементов которых не определена. Чтобы определить структуру (не элементы!) задаются соотношения, в которых находятся между собой элементы множества, называемые *аксиомами структуры*. Если речь идет о «некорректно-поставленных» задачах, столь типичных для ВД, в них система аксиом структуры, задаваемых базовыми операторными уравнениями первого рода, не полна и должна быть дополнена *априорной информацией*, без которой исходная задача не может быть регуляризована и решена. Естественным и наиболее совершенным математическим языком для описания структур является *теория групп*. Возникшая в начале XIX-го столетия в связи с решенной Гауа проблемой точной классификации алгебраических уравнений в радикалах эта теория находит широчайшее применение в теоретической физике

XX-го столетия, а со второй половины XX-го столетия и за пределами физики. Как известно, теория групп хорошо приспособлена для выявления *инвариантных свойств* объекта (так называемых *структурных инвариантов*), – свойств, остающихся неизменными при теоретико-групповых преобразованиях. (Структура – это «целое», тогда как все изменения, задаваемые автоморфизмами группы происходят на уровне элементов). В становлении теории групп как прикладной дисциплины большую роль сыграли работы Е.С. Федорова (теоретический вывод в 1890 г. 230 пространственных кристаллографических групп, т. н. «федоровских групп» – первое применение теории групп непосредственно в естествознании) и П. Кюри (см. его работы по фазовым переходам). Уже в 90-х гг. А. Пуанкаре начинает применять теорию групп для структурного анализа таких объектов как «законы природы», например уравнения Максвелла (группа Лоренца-Пуанкаре).

«Структурные» теоретико-групповые соображения могут быть применены и для решения «некорректно-поставленных» задач. В любом объекте (например в изображении, или в объекте контроля, исследуемым средствами ВД) присутствует скрытая симметрия. В рамках «структурно-ориентированных методов обработки изображений» она систематически используется в качестве априорной информации при решении соответствующей «некорректной задачи». Существенно новым элементом в данном подходе является то, что сформулированные на языке теории групп инвариантные свойства объектов рассматриваются как *статистические гипотезы*. Развита соответствующая математическая техника для проверки этих гипотез и оценки структурных инвариантов и, таким образом, создан аппарат их статистической поддержки. Наличие полной совокупности автоморфизмов объекта т. е. существование группы его (в данном случае неточной) симметрии оценивается статистически, в связи с чем введены *меры сходства* и *меры различия* для оценки такой неточности. Для их конструирования используются как классические методы математической статистики, так и *неклассические статистики*, выводимые на основе нелинейного обратного проецирования.

Априорная информация о «скрытой симметрии» объекта, вводимая в «некорректную задачу», во многих практически важных случаях может быть задана группой «локальной симметрии», основанной на *геометрии в малом*. Это *группа Ли*, в вырожденных случаях – конечная группа. Структурные инварианты являются в этом случае топологическими инвариантами относительно автоморфизмов групп Ли. При «локальных разрушениях» объекта, например, изображения, его топология также нарушается, однако инварианты продолжают сохраняться интегрально – не в бесконечно малой, а в некоторой конечной окрестности элемента изображения. Варьируя «ключевую» группу (иными словами, варьируя «аксиомы структуры») с соответствующей статистической поддержкой можно осуществлять «морфинг» обрабатываемого объекта. (т. е. целенаправленное преобразование его в другой объект) и, таким образом, визуализировать его различные «смысловые структуры», например, формировать его *карту дефектности*. Подчеркнем, что задаваемая группой «локальной симметрии» априорная информация проверяется в ходе решения задачи и может быть отвергнута на основе статистических критериев значимости.

Хотя методы структурно-ориентированной фильтрации, с использованием «локальной симметрии» объекта разнообразны, довольно часто их можно представить в традиционной форме алгоритма пространственной фильтрации со «скользящим окном», общая схема которого знакома и привычна большинству «потребителей» программного обеспечения для обработки изображений. Заметим, что теоретико-групповые алгоритмы пространственной фильтрации – квазитомографические т. к. теоретико-групповые автоморфизмы порождают «внутренние ракурсы» объекта, в данном случае преобразованные различным образом микроизображения внутри

«скользящего окна». Для конечной группы порядка L возникнет L «внутренних ракурсов», для группы Ли их «число» континуально-бесконечно, однако в конкретных практических алгоритмах используется какое-то конечное подмножество из них. По набору внутренних ракурсов оцениваются характеристики элементов изображения внутри окна, чаще всего это результирующая яркость центрального элемента.

Рассмотрим теоретико-групповые алгоритмы пространственной фильтрации, пригодные для выявления таких объектов, как зона формирования трещин в сварном шве. Микро-трещины, дающие вклад в проекционную картину зоны, представляют собой протяженные образования. Если они не дают никакого вклада в локальное изображение внутри скользящего окна, то данное изображение в пределах статистической значимости уместно считать изотропным. В противном случае возникают значимые отклонения от изотропности. Группой локальной симметрии (или «теоретико-групповым фильтром») в данном случае будет группа вращения (называемая также группой $SO(2)$) локального изображения вокруг центрального элемента. Это группа Ли. В данном случае она описывает фон, «пустое пространство» без сигнала. Все точки зоны, рассматриваемые как центры локальных изображений, и удовлетворяющие локальной изотропии «равны» между собой. Напротив, статистически значимая анизотропия свидетельствует о появлении «смыслового сигнала» (например, «дефекта», допустим фрагмента трещины и т. п.). Здесь применимы слова П. Кюри «диссимметрия творит явление», сказанные им по другому поводу. Отклонения от нормы реже чем норма, их «информационная нагруженность» выше, поэтому естественно строить алгоритм распознавания таким образом, что симметрия описывает «фон» и «норму», т. е. наиболее вероятное и тривиальное из того, что может произойти. Наличие симметрии рассматривается, таким образом, как нулевая теоретико-групповая статистическая гипотеза, а появление «дефекта», как альтернативная гипотеза.

Алгоритмы распознавания анизотропии с $SO(2)$ в качестве ключевой группы могут быть построены разными способами. Один из рассмотренных нами подходов, связан с модификацией известного в обработке изображений преобразования Хоха [21], математически эквивалентному преобразованию Радона [22]. К сожалению, эти методы пригодны только для повышения визуального распознавания и качественной оценки очень ограниченного класса изображений. Согласно изложенной нами схеме преобразование Радона-Хоха как метод обработки изображений может быть усовершенствовано и превращено в нормальную процедуру пространственной фильтрации путем его применения к локальному изображению в пределах «скользящего окна». Но в этом случае она должна быть дополнена последующим синтезом одномерных радоновских проекций для статистической оценки функций от элементов изображения («статистик») внутри окна. Статистическое оценивание это «обратная задача», тогда как преобразование Радона и Хоха решают прямую задачу. По сути дела, процедуры статистических выводов в этом случае представляют собой некоторые из реализаций (нелинейных и статистических) обратного преобразования Радона. Естественно, они никак не нацелены на реконструкцию исходного локального изображения, но они эффективны в оценке «статистик», ответственных за распознавание «вторичных» смысловых элементов. В случае изотропии преобразование Радона переходит в известное преобразование Абея, широко используемое в диагностике плазменных пучков [23]. Все абелевские проекции равны между собой. Распознавание анизотропии сводится, таким образом, к выделению невырожденных «радоновских» объектов из фона предполагаемых «абелевских». Статистическое решение этой задачи строится на основе дисперсионного анализа совокупности N радоновских проекций (неполного радоновского образа локального изображения), как мера различия проекций в этой совокупности.

В другом варианте алгоритма распознавания анизотропии (с меньшей «вычислительной стоимостью», но не менее эффективным) все выборочные статистики вы-

числялись только на некоторых подмножествах локального изображения, а именно вдоль прямых линий, проходящих через центральный элемент. Рассматривались N различных фиксированных направлений, соответствующих N группам данных для этих подмножеств. Для определенности предположим скользящее окно квадратным с полушириной M . Пусть r_{ij} – яркость элемента исходного изображения, g_{ij} – яркость элемента итогового изображения ($I = 1, 2, \dots, I, j = 1, 2, \dots, J$, где I и J – размерности изображения), n ($n = 1, 2, \dots, N$) номер произвольного направления, $a_{1ij}, a_{2ij}, \dots, a_{Nij}$ – средние значения и $q_{1ij}, q_{2ij}, \dots, q_{Nij}$ – среднеквадратичные в N группах данных (при вычислении этих значений центральный элемент не принимался во внимание). (Для того, чтобы в дальнейшем не делать формулы громоздкими индексы i и j будут опущены). Рассмотрим параметр n как фактор, предположительно влияющий на средние значения a_1, a_2, \dots, a_N . В соответствии с основными принципами дисперсионного анализа может быть построена статистика (F – отношение Фишера, т. е. межгрупповая дисперсия, поделённая на общую внутригрупповую) с $N-1$ и $N(2M-1)$ степенями свободы:

$$F = \frac{N(2M-1) \sum_{n=1}^N (a_n - \frac{1}{N} \sum_{l=1}^N a_l)}{(N-1)2M \sum_{n=1}^N (q_n^2 - a_n^2)}, \quad (1)$$

так что итоговое изображение описывается как (1). (Более точно, к (1) может быть применено некоторое нелинейное преобразование f типа «look-up-table» так, что $g_{ij} = f(F_{ij})$ чтобы обеспечить приемлемую для человеческого глаза гистограмму яркости). Итоговое изображение, таким образом, «рисует» статистикой Фишера, являющейся в данном случае мерой различия между средними по различным направлениям. Таким образом, в данном подходе предполагалось, что та же самая статистика, на основе которой отвергается или принимается гипотеза, может быть использована также как количественная мера отклонения от точной симметрии (здесь от изотропности) и служить как характеристика яркости результирующего изображения. Алгоритмы типа (1) были впервые «обкатаны» на контроле железобетонных конструкций [9, 10]. В этом случае структурно-ориентированная фильтрация полностью (даже без томографии) решает практическую проблему поставленную «заказчиком» т. е. инженерами строителями, осуществляющими надзор за сооружениями. Разными авторами предпринимались также попытки решить эту задачу (т. е. фильтрацию предельно зашумленных проекций) на основе хорошо известных и новых методов обработки изображений (модифицированная инверсная фильтрация, «Wavelets», процедуры, основанные на соображениях теории фракталов), однако они не привели к позитивному результату. В том случае, когда принципиальный теоретический результат уже получен, плодотворны попытки максимально упростить его до тех пределов, когда основанные на этих упрощениях алгоритмы «еще работают», давая приближенные практические результаты, не очень сильно отличающиеся от «настоящих». Варианты таких упрощенных процедур (1) можно найти в [10, 14, 13]. В данной работе мы не имеем возможности остановиться на обсуждении таких подробностей как механизмы подавления высокочастотных шумов, «отстройка» от низкочастотного тренда в алгоритмах этого типа, также как и анализ ошибок первого и второго рода при статистическом распознавании.

При контроле компонент АЭС также были испробованы многие методы и «нелинейный томосинтез» дал обнадеживающие результаты [13, 14, 16–18]. Более всего была исследована проблема обнаружения трещин в сварных швах трубопроводов атомных электростанций, наполненных теплоносителями (рис. 1).

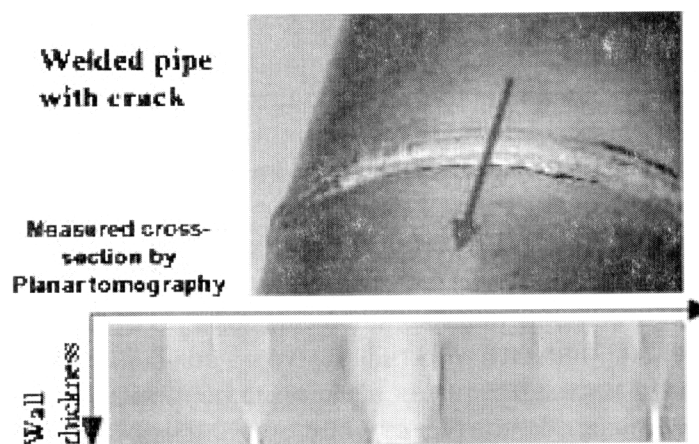


Рис. 1. Объект контроля – наполненная водой труба из аустенитной стали со сварным швом. Диаметр трубы – 140 мм и толщина – 13 мм

Геометрически, проекции (рис. 3, рис. 4, рис. 5) представляют собой развертки цилиндра (низ проекционного изображения совпадает с его верхом). Разные ракурсы получаются за счет сдвига источника излучения вдоль оси вращения трубы. Ракурсный угол между крайней и центральной проекциями – 10° . Геометрия легко приводится к «копланарной», так что проекциями можно манипулировать как в классическом томосинтезе. При этом параметр «глубины залегания слоя» меняется в пределах от внутреннего диаметра трубы до ее внешнего диаметра. При регистрации проекционных данных (рис. 2) сканер вращается вокруг трубы. О подробностях технической реализации данной системы томосинтеза см. в [13, 16–18].

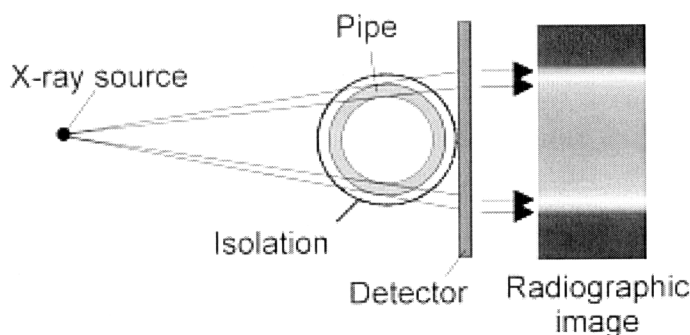


Рис. 2. Регистрация проекционных данных (сканирование трубы)

Для визуализации формирующихся трещин использовалась структурно-ориентированная фильтрация как в пространственной так и в частотной областях. Здесь приводятся результаты с применением алгоритмов пространственной фильтрации со «скользящим окном» типа (1). Присущее этим фильтрующим процедурам тонкое выделение структурных элементов трещины из разнородной информации в исходном изображении создает предпосылки для удовлетворительного синтеза томограмм даже при плохой обусловленности задачи. Уже три проекции с небольшим углом обзора достаточны для реконструкции, тем более, что (1) дает «разреженную» информацию об объекте, а нелинейный томосинтез очень хорошо работает на разреженных структурах.

На рис. 3. представлена одна из трех исходные проекции объекта контроля (кольцевого сварного шва с трещиной). На рис. 4. – результат обработки этой же проекции в области, включающей формирующуюся трещину (визуализация ROI – «region of interest») по методу структурно-ориентированной фильтрации.

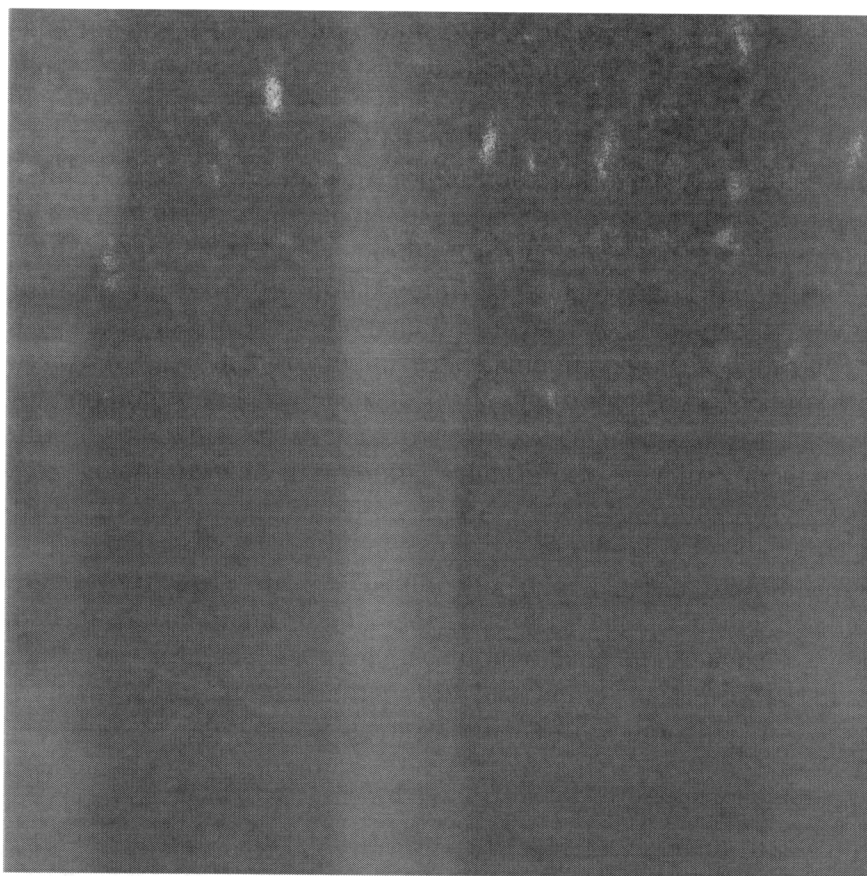


Рис. 3. Одна из исходных проекций («правая») кольцевого сварного шва в трубе

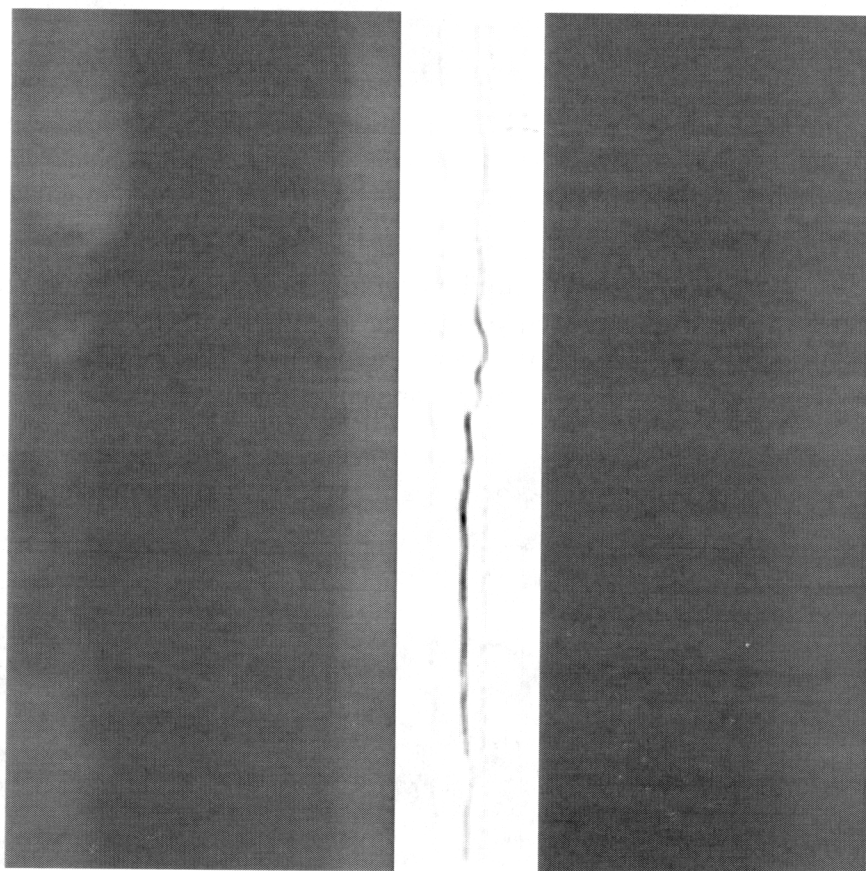


Рис. 4. Структурно-ориентированная фильтрация (для «правой» проекции)

На рис. 5. результаты фильтрации трех проекций сведены вместе для удобства обзора. На левых полосах – нефигурные центральные зоны проекций. На правых полосах – фильтрованные зоны.

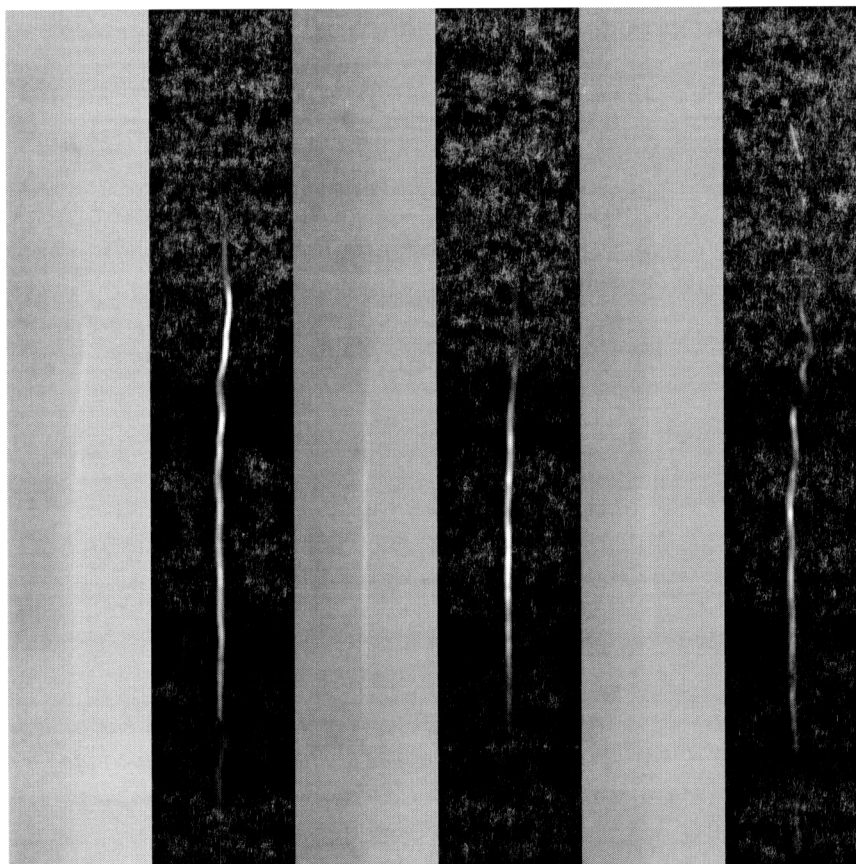


Рис. 5. Структурно-ориентированная фильтрация трещины в кольцевом сварном шве на трех проекциях (левые полосы «области интереса» на нефигурных проекциях; правые полосы соответствующие области на фильтрованных проекциях)

На рис. 6 представлено объемное изображение формирующейся трещины. Оно построено по 50 томограммам для сечений с глубинами залеганий, равномерно распределенными от внутреннего радиуса трубы до ее внешнего радиуса. Каждая из томограмм синтезировалась методом минимальных проекций [7] по трем проекциям, преобразованным по методу структурно-ориентированной фильтрации.

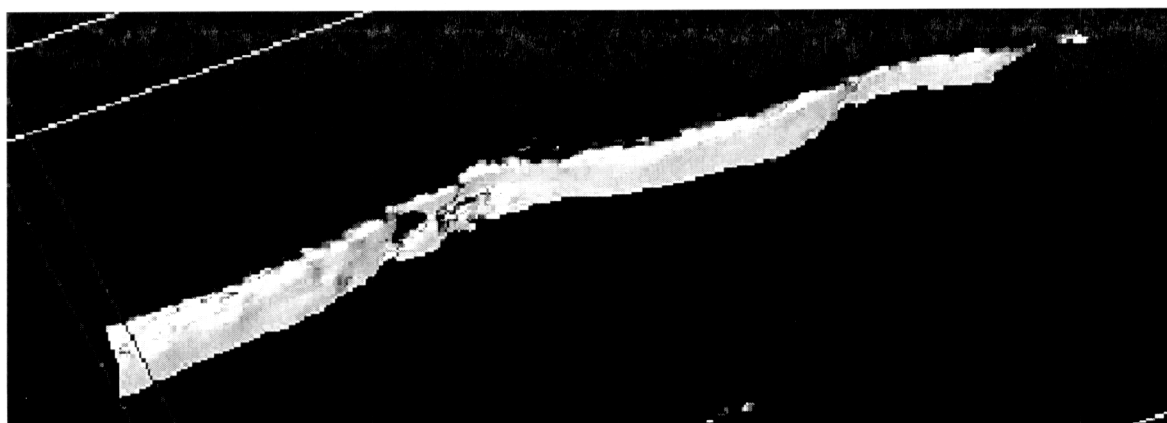


Рис. 6. Объемное изображение формирующейся трещины

Высококонтрастная радиометрическая камера [13, 14, 17, 18], использованная в этом эксперименте дает для измерения проекционных данных более высокое качество изображения в сравнении с пленочной радиографией. Измерения осуществлялись неоднократно как на АЭС, так и в лабораторных условиях. Достигнуто существенное улучшение качества изображения при контроле труб, наполненных водой – такое же, какое пленочная радиография дает для пустых труб. Методы нелинейного томосинтеза существенны для интерпретации измерений, а новые процедуры структурно-ориентированной обработки изображений – для выявления трещин и их морфологического анализа. Именно они в наибольшей степени обуславливают предсказательную ценность метода. Нелинейный томосинтез со специальной обработкой изображений позволил не только повысить выявляемость зон формирования трещин и извлечь больше информации об их форме, размерах, отдельных фрагментах и т. д., но также и оценить глубину их залегания как и глубины залегания отдельных фрагментов этих зон. Следует отметить, что точность определения этих параметров может быть еще повышена на основе разработанных специально для этой цели статистических методов.

Нелинейный томосинтез был успешно применен к традиционно наиболее трудным, (и до последнего времени «нерешаемым») задачам радиационного контроля. Успех метода во многом обусловлен единым подходом к внешне разнородным задачам, а также развитым и естественным аппаратом настройки на тип объекта контроля. Аппарат структурно-ориентированной фильтрации может служить также эффективным инструментом морфологического анализа изображений.

Мы выражаем благодарность всем нашим коллегам и соавторам (см. [13, 14, 16–18]), участвовавшим в осуществлении программы разработки диагностической системы для визуализации формирующихся трещин в компонентах АЭС.

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 thickwalled steel and concrete components using a portable 6 MeV betatron // In coll. of papers to «6-th European Conference on Non-destructive testing», Nice, France, 1994. – Vol. 2. – P. 1287–1291.
3. Баранов В.А., Чахлов В.Л., Темник А.К. Бетатронная малоракурсная томография для неразрушающего контроля // В сборнике «Кибернетика и вуз» (интеллектуальные информационные технологии) / под ред. акад. В.З. Ямпольского. – Вып. 28. – Томск, 1994. – С. 67–75.
4. Baranov V.A., Temnik A.K., Chakhlov V.L., Chekalin A.S. Betatron tomography with the use of nonlinear backprojection techniques // In coll. of papers to International Symposium on Computerized Tomography for Industrial Applications. – Berlin, 1994. – P. 271–277.
5. Baranov V.A. Convex projections reconstruction algorithms on the basis of non-linear backprojection approach // In coll. of papers to International Symposium on Computerized Tomography for Industrial Applications. – Berlin, 1994. – P. 88–95.
6. Ewert U., Schumm A., Nockeman C. (Berlin), Baranov V.A. (Tomsk, RUS), 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. – P. 471–475.
7. Baranov V.A. A Variational Approach to Non-Linear Backprojection // «Computerized Tomography», coll. of papers, Editor-in-Chief: M.M. Lavrent'ev, Utrecht, the Netherlands. – 1995. – P. 82–97. Baranov V.A. 67.

8. Baranov V.A. Non-destructive testing and ecological problem // Proc. of International conference «Fundamental and applied problems of environment protection». – Tomsk, 1995. – P. 7.
9. Baranov V., Ewert U. Industrial application of digital tomosynthesis and special types of non-linear backprojection algorithms // In coll. of papers to International Symposium «Computer Methods and Inverse Problems In Non-Destructive Testing and Diagnostics» (CM NDT – 95). – Minsk, 1995. – P. 82–86.
10. Ewert U., Baranov V., Borchard K. Cross-sectional imaging of building elements by new non-linear tomosynthesis technique using imaging plates and ^{60}Co radiation» // invited paper in «NDT & E International», 1997 Elsevier Science Ltd. – Vol. 30. – № 4. – P. 243–248.
11. Баранов В.А., Эwert У. Алгоритмы нелинейного томосинтеза со структурно-ориентированной фильтрацией проекций и их применение в неразрушающем контроле // В юбилейном сборнике (к 30-летию НИИ ИН) «Неразрушающий контроль и диагностика». – Томск, 1998. – С. 23–27.
12. Баранов В.А., Темник А.К., Чахлов С.В., Чекалин А.С. Вычислительная диагностика на базе алгоритмов томосинтеза // В научно-технич. сборнике «Трансферные технологии в информатике» / под ред. проф. В.К. Погребного. – Томск, 1999. – С. 6–11.
13. Ewert U., Redmer B., Müller J, Trobitz M (Berlin), Baranov V (Tomsk, RUS). Mechanisierte Durchstrahlungsprüfung von Rundschweissnäthen – Prüfung mediengefüllter Rohrleitungen und Tiefenlagebestimmung durch Tomosynthese // 23 MPA-Seminar «Sicherheit und Verfügbarkeit in der Anlagentechnik» mit dem Schwerpunkt «Verhalten von druckfürenden Komponenten und Systemen bei erhöhten Belastungen», Staatliche Materialprüfungsanstalt (MPA), 1997 Universität Stuttgart, Band 23. – P. 13.1–13.14.
14. Redmer B., Ewert U., Onel Y. (Berlin), Müller J. (Frechen), Diener H. (Nürnberg), Walkman M. (Gundremmingen), Baranov V. (Tomsk, Russia) Automated radiometric weld inspection in nuclear power industry by tomosynthesis // In coll. of papers to International Symposium «Computer Methods and Inverse Problems in Nondestructive Testing and Diagnostics (CM NDT-98)». – Minsk, 1998. – P. 441–448.
15. Баранов В.А. (Томск), Эwert У. (Берлин) Обнаружение трещин на основе алгоритмов нелинейного томосинтеза и структурно-ориентированной фильтрации с выпуклыми ограничениями // Тезисы докл. 15-й Российской научно-технической конференции «Неразрушающий контроль и диагностика». – М., 1999. – С. 192.
16. Ewert U., Redmer B., Schmitger D. (BAM, Berlin), Müller J (COMPRA, GmbH, Frechen). Baranov V. (Institute of Introscopy, Tomsk), Likhachov A. (Institute of Theoretical and Applied Mechanics, Novosibirsk) Perspectives of weld inspection by computerized industrial radiology // Тезисы докл. 15-й Российской научно-технической конференции «Неразрушающий контроль и диагностика». – М., 1999. – С. 238.
17. Ewert U., Redmer B., Onel Y. (BAM-Berlin, Germany), Baranov V.A. (Institute of Introscopy, Tomsk, Russia) Tomographic Methods of Crack Detection for components of Nuclear Power Industry // 15-th World Conference on Nondestructive Testing (Rome – 2000, CD of proceedings).
18. Redmer B., Ewert U, Onel Y. (BAM-Berlin, Germany), Lichachev A.V., Pickalov V.V. (Institute of Theoretical and Applied Mechanics, Novosibirsk, Russia), Zheng Li (Tsinghua University, China), Baranov V.A. (Institute of Introscopy, Tomsk, Russia) Sensitive Detection of Planar Defects by a Mechanized Radiometric Weld Inspection System // 15-th World Conference on Nondestructive Testing (Rome – 2000, CD of proceedings).
19. Baranov V., Ewert U. A group theoretical approach to ill-posed problems» // Book of abstract to 3-d international scientific conference «Computer Methods and Inverse Problems in NDT and Diagnostics» (CM NDT – 2001). – Moscow, 2002. – P. 11–12.

20. Baranov V., Ewert U., Redmer B. Reconstruction of cracks on the basis of group-theoretical algorithms of situational recognition // Book of abstract to 3-d international scientific conference «Computer Methods and Inverse Problems in NDT and Diagnostics» (CM NDT – 2001). – Moscow, 2002. – P. 39–40.
21. Hough P.V., Method and Means for Recognizing Complex Patterns // U.S. Patent 3069654, December 18, 1962. 51.
22. Radon J., Uber die Bestimmung von Functionen durch ihre integralwerte langs gewisser Mannigfaltigkeiten // Leipzig: Verh. Verh. Sachs. Acad. Wiss., 1917.
23. Пикалов В.В., Мельникова Т.С., Томография плазмы (В серии «Низкотемпературная плазма», 13), Новосибирск, «Наука», 1995.

УДК 53.082.2+681.26.751

РАЗРАБОТКА АВТОМАТИЗИРОВАННОЙ СИСТЕМЫ КОНТРОЛЯ УТЕЧЕК НЕФТЕПРОДУКТОВ ИЗ РЕЗЕРВУАРНЫХ ПАРКОВ

*Ю.В. Царенко, В.П. Бобров, С.Н. Телепнев
ГНУ «Институт технической акустики НАН Беларуси»
210023, г. Витебск, пр-т Людникова, 13
тел. +375-212-261182, E-mail: labpt@vitebsk.by*

Разработаны новые устройства для измерения массы нефтепродуктов в вертикальных цилиндрических резервуарах. В качестве параметра, по которому судят о наличие утечек в резервуарах, предлагается использовать изменение массы контролируемого продукта с течением времени. Для анализа полученных результатов измерений, диагностики наличия и величины утечки используется специальное программное обеспечение.

В нефтехимической промышленности и энергетике одной из важнейших задач является обеспечение учета и контроля за нефтепродуктами. Постоянный контроль, регулирование и учет этих параметров дает возможность воздействовать на ход процесса, повышает эффективность производства и снижает их себестоимость, а также значительно снижает вероятность экологических катастроф.

Оперативное определение утечек из хранилищ нефтепродуктов является весьма важной как экологической, так и экономической задачей, поскольку ущерб от подобных аварий исчисляется порой значительными средствами. Стальные резервуары представляют собой сварную конструкцию высотой до 20 м и диаметром до 50 м. Особенно это важно для подземных или засыпанных грунтом резервуаров, где невозможен визуальный контроль при утечках в случае трещин в стенках, а также весьма затруднен доступ, контроль и обслуживание дна резервуара.

Существующие методы контроля за утечками топлива из цилиндрических резервуаров являются трудоемкими и имеют, как правило, невысокую точность измерения.

Деформация резервуара под воздействием температуры, внутреннего давления и веса, находящегося внутри продукта, приводит к смещению реперных точек и, как следствие, к большой фактической погрешности в определении уровня жидкости объемно-массовым методом.

Условия хранения отдельных нефтепродуктов в резервуарах, например, мазута существенно отличаются от условий хранения других нефтепродуктов. В реальных ус-