

На правах рукописи

Баранов Владимир Александрович

**НЕЛИНЕЙНЫЕ СТРУКТУРНО-ОРИЕНТИРОВАННЫЕ
МЕТОДЫ ОБРАБОТКИ ИЗОБРАЖЕНИЙ
ДЛЯ НЕРАЗРУШАЮЩЕГО КОНТРОЛЯ**

05.11.13 — Приборы и методы контроля
природной среды, веществ, материалов и изделий

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
доктора технических наук

Томск - 2014

Работа выполнена в Федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Национальный исследовательский Томский политехнический университет»

Научный консультант: **Кулешов Валерий Константинович,**
доктор технических наук, профессор

Официальные оппоненты: **Смирнов Александр Николаевич**
доктор технических наук, профессор
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Кузбасский государственный технический университет имени Т.Ф. Горбачева», г. Кемерово, профессор кафедры «Технология машиностроения»

Новиков Виталий Федорович
доктор физико-математических наук, профессор
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Тюменский государственный нефтегазовый университет» (ТюмГНГУ), г. Тюмень, заведующий кафедрой физики методов контроля и диагностики

Мурыгин Александр Владимирович
доктор, технических наук, профессор
ФГБОУ ВПО «Сибирский государственный аэрокосмический университет имени академика М.Ф. Решетнева», г. Красноярск, заведующий кафедрой информационно-управляющих систем

Ведущая организация Федеральное государственное бюджетное учреждение науки «Институт физики прочности и материаловедения» Сибирского Отделения Российской академии наук, г. Томск

Защита диссертации состоится «29» декабря 2014 года в 16.00 на заседании диссертационного совета Д 212.269.09 при ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский Томский политехнический университет», по адресу: 634028, г. Томск, ул. Савиных, 7, ауд. 215.

С диссертационной работой можно ознакомиться в научно-технической библиотеке Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Национальный исследовательский Томский политехнический университет» по адресу: 634034, г. Томск, ул. Белинского, 55 и на сайте: <http://portal.tpu.ru/council/916/worklist>.

Автореферат разослан « » 2014 г.

Ученый секретарь диссертационного совета
Кандидат технических наук, доцент



Васендина Е.А.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы диссертации. Возникновение вычислительной томографии (ВТ) явилось переломным моментом для интроскопии, ибо впервые появились методы визуализации внутреннего строения объекта, точно соответствующие ее программным целевым установкам. Однако, за прошедшие десятилетия ВТ все-таки не стала массовым инструментом неразрушающего контроля (НК). Не отрицая сложных проблем ее технической реализации, отметим, что это обусловлено, главным образом, непреодоленными концептуальными трудностями адаптации томографа, нацеленного на решение задач ВТ в медицинской диагностике (МД), к нуждам НК.

Одним из недостатков ВТ традиционного типа явилась перегруженность томограммы ВТ излишней информацией, представляющей для дефектоскописта смысловой шум, затрудняющий распознавание дефектов. И в то же время существует ряд явлений, надежная диагностика которых исключительно важна для практической дефектоскопии и которые “традиционная”, например, трансмиссионная рентгеновская ВТ попросту не способна выявить. В качестве примеров можно привести отслоение топлива от стенок твердотопливной ракеты или же развитую зону формирования микротрещин в сварных швах.

Распознавание и визуализация такого рода структур требует специфических методов “направленной реконструкции”. Круг таких задач достаточно широк, что побуждает разрабатывать системы реконструкции изображений, в которых отход от жестких установок традиционной ВТ может быть весьма значительным. Например, в НК наблюдается тенденция решать задачу реконструкции в виртуальном пространстве дефектов (*virtual defect space*), давая тем самым дефектоскописту максимум смысловой (семантической) информации об объекте контроля при минимуме смыслового шума. Это естественно, поскольку с профессиональной точки зрения, его интересует вовсе не какое-то абстрактное скалярное поле коэффициента линейного ослабления рентгеновского излучения, а *карта дефектности* объекта контроля.

Осознание и преодоление слабых сторон ВТ в ее первоначальных реализациях в немалой степени способствовало становлению интенсивно развивающейся в наше время *реконструктивной вычислительной диагностики* – РВД, расценивающейся ведущими учеными как одного из наиболее приоритетных

направлений в развитии современной науки. РВД рассматривается в настоящее время в качестве теоретической дисциплины, занимающаяся разработкой общих реконструктивных методов ВТ и обработки изображений (ОИ), включая распознавание образов, морфологический анализ изображений и множество других прикладных областей.

В целом реконструктивные задачи в НК оказались и намного более трудными и в меньшей степени поддающимися стандартизации, чем в МД. В отличие от МД, в НК упомянутые выше “нетипичные” задачи преобладают. С математической точки зрения это обратные задачи с “острой некорректностью”.

В отличие от ВТ для РВД характерна существенно большая степень диверсификации задач, в силу чего весьма актуальна проблема унификации подхода к внешне разнородным задачам. Это вполне достижимо в рамках предложенного диссертантом “структурно-ориентированного” подхода к исследованию и реконструкции объектов, основанного на сближении классического структурного метода с методами математической статистики.

Данная тема допускает и более конкретную “расшифровку” как развитие статистических теоретико-групповых моделей реконструкции изображений и разработка на их основе методов, пригодных для решения остро некорректных обратных задач НК. Наиболее радикальный шаг в развитии этого подхода к реконструкции объектов контроля состоит в том, что в нем впервые и систематически проводится сближение методов теории групп с методами математической статистики.

Цель исследования — создание полного комплекса теоретико-групповых статистических методов, пригодных для решения широкого круга “некорректных” задач РВД в НК, в т.ч. остро-некорректных обратных задач, а также теоретическое обоснование развитых реконструктивных методов с позиций современного структурного (главным образом, теоретико-группового) подхода к распознаванию и реконструкции структурно-функциональных связей в объекте контроля.

Задачи исследования. Среди первоочередных задач исследования выделяются два больших класса: 1) Развитие собственно томографических реконструктивных методов для радиационного контроля на базе нелинейных модификаций томосинтеза; 2) Разработка процедур цифровой фильтрации и ОИ для предобработки проекционных изображений и для постобработки томо-

грамм. Решение задач первого класса основывалось на предложенных автором оценках нелинейного обратного проецирования. Общее название этого класса “методы нелинейного томосинтеза”. Они создавались главным образом для нужд малоракурсной томографии в радиационном контроле и широко использовались в т.н. бетатронной томографии при контроле крупногабаритных изделий, а также в других системах радиационной интроскопии, в частности для контроля изделий микроэлектроники и в томографических системах с использованием термолюминесцентных экранов памяти.

В дальнейшем в соответствии с целями исследования были поставлены следующие задачи:

1) Теоретическое обоснование методов нелинейного томосинтеза, на основе вариационного подхода к нелинейному обратному проецированию, а также выявления связей между предложенным автором методом минимальных проекций и известными методами проекций на выпуклые множества. Раскрытие теоретико-групповой статистической природы оценок нелинейного обратного проецирования.

2) Теоретическое обоснование структурно-ориентированных методов фильтрации изображений.

3) Развитие общего теоретико-группового статистического подхода к решению задач реконструкции по неполной и зашумленной информации об объекте реконструкции, путем выявления структурно-функциональных связей в нем на основе статистических оценок инвариантов его группы автоморфизмов.

4) Развитие теоретико-группового статистического подхода к решению обратных реконструктивных задач и разработка методов ОИ, основанных на исследовании изображений локальными группами Ли в рамках “геометрии в малом”.

5) Разработка теоретико-групповых статистических методов решения реконструктивных задач для эволюционирующих объектов.

Объекты исследования

“Объектами” данного исследования являются общеизвестные математические модели решения реконструктивных задач и развитые в их рамках программные инструменты. (Более всего это касается моделей, основанных на “локальной регуляризации” реконструктивных задач и на принципах нели-

нейного обратного проецирования). Проводится критический анализ известных реконструктивных процедур с целью преодоления их недостатков и развития унифицированного подхода к реконструкции изображений

Методы исследования

Теоретической базой для исследований по теме диссертации является современный структурный подход. Поскольку для него характерно целостное рассмотрение “проблемного поля”, он, как правило, приводит к возникновению и определенного “междисциплинарного поля”. В этом плане данная диссертация не является исключением. Предложенные теоретико-групповые статистические методы НК развиваются “на стыке” традиционных направлений в развитии современной математики: 1) теории групп и геометрии, 2) математической статистики, 3) теории решения обратных задач.

Научная новизна работы заключается в развитии структурно-ориентированного подхода к классификации и реконструкции объектов, в котором систематически проводится сближение теоретико-групповых методов с методами математической статистики. Это позволило разработать теоретико-групповые реконструктивные методы и адекватные математические инструменты для численного решения остро-некорректных задач.

1) Предложен и развит теоретико-групповой статистический подход к решению обратных некорректных задач реконструкции объектов по неполной и зашумленной информации о них, позволяющих выявлять структурно-функциональные связи в объекте на основе статистических оценок инвариантов его группы автоморфизмов.

2) Предложен и разработан общий метод пространственной фильтрации зашумленных изображений, основанный на исследовании исходного изображения локальными группами Ли в рамках “геометрии в малом”, осуществляемый путем проверки для каждого элемента изображения статистической теоретико-групповой гипотезы о том, что заданная группа Ли является группой автоморфизмов локального изображения в окрестности данного элемента.

3) Разработан метод пространственной фильтрации зашумленных изображений, основанный на распознавании локальной анизотропии микроизображения в “скользящем окне” просмотра данных, осуществляемый путем проверки для каждого элемента изображения статистической теоретико-групповой

гипотезы об инвариантности микроизображения в окне относительно преобразований из группы $SO(2)$. Проверка гипотезы осуществляется на основе дисперсионного анализа и степень отклонения микроизображения от изотропии оценивается на основе дисперсионного отношения Фишера.

4) Осуществлены применения метода пространственной фильтрации зашумленных изображений с локальной группой $SO(2)$ для решения ряда задач НК, в частности для диагностики строительных конструкций.

5) Предложены и исследованы оценки нелинейного обратного проецирования в томографии и их аналоги в ОИ. Разработан вариационный подход к нелинейному обратному проецированию, позволяющий получать оптимальные оценки. Выявлены связи между методом минимальных проекций и методами проекций на выпуклые множества, а также раскрыта теоретико-групповая статистическая природа оценок нелинейного обратного проецирования.

6) Предложена, развита, теоретически обоснована, и подтверждена на практике концепция “нелинейного томосинтеза”, включающая в себя взаимно-согласованные методы нелинейного обратного проецирования и методы структурно-ориентированной ОИ, что позволило существенно расширить диапазон задач РВД, решаемых в НК и сделать нелинейный томосинтез одним из наиболее пригодных для массового применения в НК реконструктивных методов.

7) Предложен теоретико-групповой подход к трактовке понятия “дефект”. Локальная группа Ли в теоретико-групповых фильтрах использована в качестве инструмента для определения структурной нормы контроля. Рассмотрены методы распознавания аномальных структурно-функциональных связей в объекте контроля и формирования его карты дефектности путем проверки составной теоретико-групповой статистической гипотезы.

8) Исследованы симметрические аспекты принципа причинности в алгоритмах пространственной фильтрации изображений с локальной группой Ли, что является развитием на статистической основе классического принципа диссимметризации П.Кюри.

9) Предложены теоретико-групповые статистические методы разделения “сосуществующих” в хаотическом объекте контроля разнородных “семантических структур” (“смысловых полей”), инвариантных относительно преобразований из разных групп Ли. На этой основе разработан метод “смысловой фильтрации” объекта исследования и, в частности, метод квазитомографиче-

ской визуализации зон формирования трещин в объекте контроля под воздействием факторов, приводящих к преимущественной ориентации микротрещин.

Практическая значимость и внедрение результатов. Связь диссертационной работы с крупными научными программами.

Практическая значимость работы заключается в том, что разработанные методы реконструктивной вычислительной диагностики позволили решать актуальные (ранее не решаемые) задачи неразрушающего контроля. Наиболее успешным применением методов структурно-ориентированной обработки изображений и нелинейного томосинтеза было при: 1) контроле деталей машин и крупногабаритных изделий, 2) контроле строительных конструкций, 3) контроле и мониторинге компонентов ядерных реакторов и атомных электростанций в процессе их работы.

Предложенные методы были успешно применены в нескольких международных научно-исследовательских программах.

Среди них: 1) Программа разработки новых методов контроля строительных конструкций, осуществленная “Федеральным институтом по контролю и исследованию материалов” (“БАМ”, Берлин) при технической поддержке фирмы Fuji Film Europe (Дюссельдорф). 2) Исследовательская программа “БАМ”а совместно с несколькими немецкими институтами и Немецкой ассоциацией электростанций по развитию методов неразрушающего радиационного контроля и диагностики компонентов атомных электростанций. 3) Работа по контракту между НИИ Интроскопии (Томск) и “Фраунгоферовским институтом неразрушающего контроля” (г. Саарбрюккен, Германия) по теме “Бета-тронная томография”. 4) Работа по контракту между НИИ Интроскопии (Томск) и “Северокитайским институтом технологии” (г. Тайюань) по созданию томографа для контроля крупногабаритных изделий на основе методов нелинейного томосинтеза.

Апробация результатов работы. Основные положения и результаты диссертации обсуждались: на 4-й Всесоюзной школе по оптической обработке информации (Минск, 1982 г.), на Всесоюзной конференции “Робототехника и автоматизация производственных процессов” (Барнаул, 1982 г.), на Всесоюзной научно-технической конференции “Обработка изображений и дистанционные исследования” (Новосибирск, 1984 г.), на 5-й Всесоюзной школе по оп-

тической обработке информации (Киев, 1984 г.), на Второй Всесоюзной межвузовской научно-технической конференции “Радиоволновые, оптические и тепловые средства неразрушающего контроля качества промышленных изделий” (Одесса, 1985 г.), на 5-ом отраслевом научно-техническом совещании “Повышение надежности и качества авиационной техники средствами неразрушающего контроля, (Андропов, 1986), на Шестом Всесоюзном совещании по применению ускорителей заряженных частиц в народном хозяйстве (Ленинград 1988), на Всесоюзной конференции “Измерения в медицине и их метрологическое обеспечение”, на 6-м научно-техническом совещании “Состояние и перспективы развития методов и средств неразрушающего контроля авиационной техники” (Ульяновск, 1989 г.), на 4-м Всесоюзном симпозиуме по вычислительной томографии (Ташкент, 1989), на Всесоюзной конференции “Обработка изображений и дистанционные исследования” (Новосибирск, 1990), на международном симпозиуме “Computerized Tomography for Industrial Applications” (Berlin, 1994), на 6-й Европейской конференции по неразрушающему контролю (Ницца, 1994), на конференции “Deutsche Gesellschaft für Zerstörungsfreie Prüfung e.V., Jahrestagung 1995 (100 Jahre Röntgenstrahlen und die heutige Vielfalt Industrieller ZfP-Praxis)”, (Aachen, 1995), на международном симпозиуме “Non-Destructive Testing in Civil Engineering” (NDT-CE), (Berlin, 1994), на международном симпозиуме “Computer Methods and Inverse Problems In Non-Destructive Testing and Diagnostics” (CM NDT — 95, CM NDT - 2001), (Minsk, 1995, Moscow 2002), на конференции “Das 33 Forschungskolloquium “Deutscher Ausschuss für Stahlbeton”” (Berlin-Dahlem, 1996), на конференции “Deutsche Gesellschaft für Zerstörungsfreie Prüfung e.V., Jahrestagung 1996 (Die ZfP der DACH-Länder im Spiegelbild internationaler Normung)”, (Lindau, 1996), на конференции 23 MPA-Seminar “Sicherheit und Verfügbarkeit in der Anlagentechnik” mit dem Schwerpunkt “Verhalten von druckführenden Komponenten und Systemen bei erhöhten Belastungen”, (Universität Stuttgart, 1997), на международном симпозиуме “Computer Methods and Inverse Problems in Nondestructive Testing and Diagnostics”, (Minsk, 1998), на 15-й Российской научно-технической конференции “Неразрушающий контроль и диагностика”, (Москва, 1999 г.), на конференции “15-th World Conference on Nondestructive Testing” (Рим, 2000), на конференции “10th European Conference on Non-Destructive Testing, Moscow – 7-11 June 2010”, на XV Международной научно-практической кон-

ференции “Качество – стратегия XXI века”, Томский политехнический университет, (Томск, 2010), на I Всероссийской с международным участием научно-практической конференции по Инновациям в неразрушающем контроле (Sib-Test), 25-29 июля 2011 г., Томский политехнический университет, (Томск 2011), на II Всероссийской с международным участием научно-практической конференции по Инновациям в неразрушающем контроле (SIBTEST-2013), 12-17 августа 2013 г., Оз. Байкал.

Основные положения, выносимые на защиту:

1. Теоретико-групповой статистический подход к решению задач реконструкции объектов по неполной и зашумленной информации о них, позволяющий выявлять структурно-функциональные связи в объекте на основе статистических оценок инвариантов его группы автоморфизмов.

2. Метод пространственной фильтрации зашумленных изображений, основанный на исследовании исходного изображения локальными группами Ли в рамках “геометрии в малом” и осуществляемый путем проверки для каждого элемента изображения статистической теоретико-групповой гипотезы об идентичности заданной группы Ли группе автоморфизмов локального изображения в окрестности данного элемента

3. Метод пространственной фильтрации зашумленных изображений, основанный на распознавании локальной анизотропии микроизображения в “скользящем окне” просмотра данных, осуществляемый путем проверки для каждого элемента изображения статистической теоретико-групповой гипотезы об инвариантности микроизображения в окне относительно преобразований из группы $SO(2)$.

4. Концепция нелинейного обратного проецирования, позволяющая получать эффективные оценки решений реконструктивных задач в томографии и ОИ.

5. Метод “нелинейного томосинтеза”, основанный на оценках нелинейного обратного проецирования и структурно-ориентированной обработке изображений.

6. Статистический теоретико-групповой подход к трактовке понятия “дефект”.

7. Квазитомографический теоретико-групповой подход к разделению разнородных “смысловых полей” в объекте контроля путем статистической

теоретико-групповой фильтрации как с применением дисперсионного анализа, так и на основе оценок нелинейного обратного проецирования

Публикации. Основное содержание диссертационной работы отражено в 104 научных и научно-технических работах автора. Из них 60 статей в российских и зарубежных изданиях, 38 тезисов докладов, 4 депонированных статьи, 1 монография, 1 научно-технический отчет. Из статей 27 – в журналах, рекомендованных списком ВАК, остальные в других журналах и сборниках трудов.

Личный вклад соискателя. Представленные в диссертации теоретические положения, новые реконструктивные методы, также как алгоритмы и программные инструменты являются разработками автора. Помощь от коллег и соавторов получена главным образом в экспериментальной части работы. Совместно с ними осуществлялось и системотехническое проектирование новых программно-аппаратных комплексов РВД.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, шести глав с выводами, заключения (основных результатов) и списка литературы, включающего в себя 232 наименования. Диссертация содержит 290 страниц основного текста и 41 рисунок.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы, сформулированы цели и задачи исследований, научная новизна полученных результатов, обоснована практическая значимость результатов, разъяснен личный вклад автора, приведены защищаемые положения и описана структура диссертации

В первой главе рассмотрены различные аспекты интенсивно развивающейся в настоящее время реконструктивной вычислительной диагностики с позиций структурного подхода. Отмечено непрерывное расширение сферы приложений РВД. При этом особое внимание уделено ее традиционной области приложений – “математической интроскопии”. Подчеркнута адекватность методов РВД для направленной реконструкции и формирования “карт дефектности” объекта контроля. Выделены классы реконструктивных задач, для которых традиционные методы ВТ неприменимы и для которых реконструкция может быть только “направленной”, непосредственно связанной с выявлением

семантической (смысловой) информации об объекте контроля. Обращено внимание на перегруженность томограмм смысловыми шумами и актуальность проблемы смысловой фильтрации.

Привлечено внимание к тому факту, что в настоящее время среди специалистов (как “прикладников”, так и математиков) пока еще нет единства в понимании того, что же такое обратная задача, поэтому в литературе можно встретить на удивление разнообразные ее трактовки и определения. Исследованы наиболее общие свойства обратной задачи, исходя из определения математической модели А.Н.Тихоновым, и дана ее интерпретация на основе структурного подхода.

Отмечена множественность “смыслов”, заложенных в исходный информационный образ объекта контроля, и в связи с этим множественность решений обратной задачи, на основе каждого из которых культивируется вполне определенный “смысл”, трактующийся как целостность, инвариантная относительно ее преобразований самоподобия. Введено понятие формальной “смысловой структуры”, представляющей “смысл”. При теоретико-групповом подходе к решению это группа автоморфизмов “смысла”.

Выяснены причины недостаточности классического структурного подхода для компьютерного (т.е. “численного”) решения обратных задач в его “классических” (детерминистских) вариантах. Обоснована необходимость развития теоретико-группового статистического подхода для решения обратных реконструктивных задач. В общих чертах обрисованы его возможности и потенциальные сферы приложения.

Во второй главе рассмотрены математические модели, развитые автором для решения реконструктивных задач теоретико-групповыми статистическими методами. Выявлены возможности дифференциальной геометрии многообразий для теоретико-групповой статистической реконструкции изображений в рамках “геометрии в малом”. Подробно изложены развитые автором методы статистической оценки и реконструкции изображений на основе локальной группы преобразований.

Предложенные методы реконструкции построены на геометриях картановского типа (т.н. *геометриях группы G*), преобразованных автором диссертации в теоретико-групповые статистические модели. Осуществляя теоретико-групповую классификацию разнородных геометрий, Ф. Клейн в “Эрланген-

ской программе” (1873) ставил следующую задачу: “Имеется многообразие и заданная в нем группа преобразований; требуется найти в многообразии те принадлежащие ему структуры, свойства которых при преобразованиях из данной группы не меняются”. И еще одна задача “Имеется многообразие и заданная в нем группа преобразований. Развивают соответствующую данной группе теорию инвариантов”. Наиболее последовательно эти установки стали реализовываться с 20-х гг. XX-го столетия, в особенности в цикле работ Э.Картана 1922-1925 гг. Этим исследованиям способствовало еще и то обстоятельство, что за прошедшие полвека обнаружились недостатки и в самом подходе Клейна к классификации многообразий, (Некоторые из римановых пространств обладают лишь тривиальной группой движений). Определенная узость точки зрения Клейна была преодолена Картаном, развившим понятие о таком пространстве, в котором теоретико-групповые преобразования задаются лишь в бесконечно малых областях. Т.н. G -пространство Клейна (т.е. множество M вместе с действующей на нем группой преобразований G) было Картаном модифицировано следующим образом. Пусть для некоторого многообразия M задана некоторая “локальная группа” G отображений, иначе говоря, совокупность отображений областей этого многообразия на себя и на соседние области, удовлетворяющая аксиомам теории групп. Тогда некоторый геометрический образ α в M называется *эквивалентным* геометрическому образу β , если в группе G существует оператор, переводящий α в β . Всю систему возможных высказываний о таких свойствах геометрических образов (и о таких величинах), которые являются инвариантными относительно всех преобразований группы G называют *геометрией группы G* .

В предварительной (нестатистической) постановке реконструктивной задачи автор диссертации рассматривает объект реконструкции т.е. изображение (которое должно адекватно описывать какой-то существенный аспект объекта контроля) как гладкое дифференциально-геометрическое многообразие μ в некотором конфигурационном пространстве S_C размерности L . В этом случае для него справедливы соображения “геометрии в малом” и возникает возможность исследовать его путем проверки теоретико-групповых гипотез.

Проверяется “нулевая” гипотеза, является ли некоторая группа Ли L_S локальной группой автоморфизмов для данного многообразия в точке с координатами $\xi_1, \xi_2, \dots, \xi_A$ элемента изображения в S_C . (Иначе говоря – является ли геометрия многообразия μ “в малом” геометрией группы L_S).

В качестве “исходных данных” для этой реконструктивной задачи фигурирует изображение $I_O (\xi_1, \xi_2, \dots, \xi_A)$ в пространстве S_C , называемое “исходным информационным образом” объекта контроля. Его структура, первоначально никак не интерпретируемая и допускающая множество виртуальных смыслов, исследуется путем проверки теоретико-групповых гипотез о нем. В процессе исследования может выясниться, что подход к описанию I_O на основе непрерывных групп неприменим. При допущении его применимости I_O отождествляется с “гладким дифференциально-геометрическим многообразием” μ . В этом сущность “нестатистической” постановки задачи.

По сути дела, гипотетическая локальная группа L_S задает “фон” нового реконструируемого изображения. Вполне понятно, что изображение как содержательное сообщение не сводится к одному лишь фону и в некоторых его элементах наблюдается понижение локальной симметрии т.е. в них автоморфизмы группы L_S не выполняются. Пониженная (существующая в отличие от L_S “объективно”) симметрия описывается какой-то другой группой L_O . Содержательность итогового изображения достигается разницей локальных симметрий L_S и L_O . Для ее количественной оценки строится неотрицательная “мера различия”.

$$\Phi = \Phi (L_S, I_O, \xi_1, \xi_2, \dots, \xi_A) \quad (1)$$

При вычислении (1) каждый из операторов g из группы Ли L_S действует в заданной точке $\xi_1, \xi_2, \dots, \xi_A$ на I_O и, таким образом, I_O “раслаивается” на систему “внутренних ракурсов” gI_O , рассматриваемых локально в некоторой окрестности точки $\xi_1, \xi_2, \dots, \xi_A$ – в т.н. *касательном пространстве* к многообразию μ в данной точке. (Многообразие μ называется *римановым*, если в каждой его точке “в малом” выполняется теорема Пифагора. В этом

случае касательное пространство является евклидовым. Однако подход (1) к оценке понижения локальной симметрии адекватен и для многообразий более общей природы).

Мера различия (1) предназначена для оценки выявленной в ходе исследования локальной диссимметрии. Если все локальные ракурсы равны между собой, то гипотетическая симметрия, задаваемая группой L_S , не нарушена и для оценки диссимметрии (1) предполагается $\Phi = 0$. Если хотя бы два из таких локальных ракурсов не равны между собой, то симметрия нарушена и для (1) должно выполняться неравенство $\Phi > 0$.

Таким образом, во “вторичном изображении” (1) представлены как инвариантные, так и неинвариантные (относительно L_S) свойства объекта (т.е. фон или “норма” с $\Phi = 0$ и “аномалии” с $\Phi > 0$), причем одновременное их присутствие принципиально необходимо.

Мера (1) является нелинейным функционалом исходного изображения I_O . При этом группа L_O не входит явно в (1) в качестве аргумента. Сконструировать (1) можно разными способами в зависимости от характера задачи. Самый простой из них – представить Φ квадратичным функционалом, точнее мерой типа дисперсии. Она строится обычным путем усреднения по группе L_S изображений gI_O , а затем усреднения по группе их квадратичных отклонений от среднего.

Гипотеза о том, что исходный информационный образ I_O объекта контроля является многообразием, которое можно исследовать на основе групп Ли L_S (“в малом”) становится бессмысленной при разрушениях информационного образа объекта (например, при зашумлении в измерительном тракте интроскопа). В общий шум внесут свою долю еще и помехи от вполне детерминистских структур с симметриями, отличными от L_S . Тем не менее, структурные инварианты, характеризующие фон, и структурно-функциональные связи реконструируемого аспекта объекта могут еще сохраняться в видоизмененной деградированной форме, не в бесконечно малой, а в некоторой конечной окрестности элемента разрушенного изображения объекта контроля. Дело в том, что алгебраические свойства объектов значительно устойчивее их “ле-

жащих на поверхности” топологических свойств. Поэтому очень многие важные для практики характеристики объекта контроля успешно “переживают” умеренные катастрофы, если еще не исчерпана статистическая избыточность той “фоновой” структуры, инвариантами, которой они предполагаются. В этом случае еще не утрачены возможности различения разнообразных заложенных в объект контроля “смыслов” (аспектов реконструкции) на основе мер типа (1).

Для реконструкции существенных свойств объекта контроля по его разрушенному информационному образу адекватен статистический подход для проверки теоретико-групповой нулевой гипотезы в некоторой “малой”, но конечной окрестности элемента исходного изображения. При этом строится мера отклонения F от условий нулевой гипотезы, аналогичная (1), но уже статистическая. Поскольку статистический метод по своей природе “выборочный”, группа L_S заменяется в F соответствующей конечной подгруппой группы L_S . Статистика F используется затем в качестве распределения яркостей итогового изображения.

Меняя ключевую группу L_S , можно выявлять другие структуры объекта контроля. На основе данного подхода разработаны алгоритмы обработки изображений, нашедшие применение в практике неразрушающего контроля.

Важной проблемой, которая решается в рамках данного подхода, является статистическая оценка структурных инвариантов изображений путем проверки о них теоретико-групповых гипотез с ключевой группой L_S . Формирование таких оценок осуществляется на основе исходного изображения I_O при взаимном сопоставлении его “внутренних ракурсов”, возникающих за счет преобразований из группы L_S . Пусть на исходном изображении (в данном случае на локальном микроизображении, в окрестности некоторого “центрального элемента” $\xi_{01}, \xi_{02}, \dots, \xi_{0A}$) определен функционал (в общем случае нелинейный)

$$\Psi = \Psi(I_O, \dots, \xi_1, \xi_2, \dots, \xi_A) \quad (2)$$

(В частности, (2) может быть определен на каком-то подмножестве пространства микроизображения). Требуется выяснить, является ли (2) инвариан-

том относительно преобразований из группы L_S . При работе с экспериментальным материалом (т.е. с I_O) это подлежащее проверке предположение рассматривается как теоретико-групповая “нулевая гипотеза”. Для решения данной задачи представим систему оценок “внутренних ракурсов” для (2) как единство, в форме

$$\Psi_L = \Psi_L(L_S, \dots, I_O, \xi_1, \xi_2, \dots, \xi_A) \quad (3)$$

т.е в (3) исходное микроизображение, как и в (1), сначала подвергается действию всех операторов g из группы Ли L_S по отдельности, и, таким образом, “расслаивается”, на “систему внутренних ракурсов” Ψ_L , а затем Ψ может быть вычислено либо непосредственно по формуле (2), либо по ее модификации, когда изображение I_O заменено нетривиальным “внутренним ракурсом” gI_O т.е.

$$\Psi = \Psi(gI_O, \dots, \xi_1, \xi_2, \dots, \xi_A) \quad (.4)$$

“Внутренние ракурсы” gI_O считаются эквивалентными, если для них равны оценки (2). Если все “ракурсы” из системы Ψ_L эквивалентны, нулевая гипотеза не отвергается.

В явно статистических моделях степень отклонения от нулевой гипотезы оценивается с использованием “мер различия”, построенных как на основе известных статистических критериев так и на основе “неклассических статистик” нелинейного обратного проецирования.

Неотрицательная мера (1) является адекватным формальным критерием для покомпонентного выделения из μ таких бесконечно малых участков, в которых условия Клейна выполнены. Это осуществляется при $\Phi = 0$, тогда как при $\Phi > 0$ эти условия нарушены. Таким образом, вычисление меры Φ по (1) дает информации больше, чем требуется для проверки условия Клейна. Выделяются не только участки с “геометрией группы L_S ”, но в других участках многообразия μ на основе меры Φ , оцениваются отклонения от этой “геометрии”. Кроме того, решение задачи Клейна алгоритмизируется (и может осуществляться компьютерно). В силу этих обстоятельств мера типа (1) является

не только полезным концептуальным инструментом, но также эффективным практическим инструментом.

Детерминистская по форме нелинейная мера типа (1), является по своей природе “квазистатистической”, иначе говоря, она работает на переходной стадии от детерминистского описания объекта исследования к статистическому и является прототипом для формирования разнообразных уже явно статистических оценок F , работоспособных в рамках “мягких” моделей.

Введение (1) сразу же вносит в теоретическую модель аспекты, чуждые “чистой геометрии”. Во-первых, многообразие μ является здесь “непредсказуемым”. (Оно не является, например, “многообразием с постоянной кривизной” или “многообразием с постоянным изменением кривизны”).

Многообразие μ с заданной на нем гипотетической группой L_S не является ни “ G -пространством Клейна”, ни “геометрией группы G ” Картана. Оно было бы таким при тривиальном условии $\Phi \equiv 0$ во всей его области определения в μ . В нем проявлены существенно информационные аспекты т.е. μ является источником и носителем информации, которая выявляется при проверке гипотез и формировании “вторичного изображения” (1). Можно сказать, что в “многообразии μ с группой L_S ” задан “текст” вместе с ключом для его расшифровки. Расшифрованным текстом является “вторичное изображение” (1).

В многообразии μ может содержаться множество такого рода “текстов”, которые “расшифровываются” разными ключами L_S . Вслед за информационными неизбежно появляются и существенно статистические аспекты μ . Изображение (1) в этом случае естественным образом заменяется полем статистических оценок, причем для построения явных статистических оценок $F(\xi_1, \xi_2, \dots, \xi_A)$ группы Ли L_S заменяются представляющими их конечными группами L_{fin} ,

$$F(\xi_1, \xi_2, \dots, \xi_A) = F\{L_{fin}, I_O(\eta_1, \eta_2, \dots, \eta_A)\} \quad (5)$$

Проверка гипотезы для каждого элемента “вторичного изображения” $F(\xi_1, \xi_2, \dots, \xi_A)$ осуществляется в соответствующем ему касательном пространстве (“в малом”), причем изначально не вводится каких-либо предполо-

.....

жений о “связности” между такими пространствами, поэтому результат проверки непредсказуем заранее. Группа G меняется при переходе от одного элемента изображения к другому и, вообще говоря, “геометрия группы G ” для каждого касательного пространства своя.

“Жесткое” осуществление проверки условий Клейна на основе (1), т.е. требование точного соблюдения критерия $\Phi = 0$, неэффективно в практическом плане. (В этом случае выделяемые из μ на основе группы L_S структуры попадут в “множество меры ноль”). Здесь уместно и естественно некоторое “размытие” условия $\Phi = 0$, что осуществляется при использовании статистических оценок (5). Конечно, для “чистой геометрии” это нехарактерно.

Далее, в первой главе рассмотрены различные способы статистических оценок (5) в конечномерных вариантах с локальной группой L_{fin} . Для построения явных статистических оценок F за исходный пункт берутся формы (1) или же (3), в которых функционалы Φ или Ψ видоизменяются с заменой в них группы Ли L_S на группу L_{fin} .

Для исходного изображения $I_O(\eta_1, \eta_2, \dots, \eta_A)$ в локальной области с центральным элементом $\xi_1, \xi_2, \dots, \xi_A$ строится система K_L “внутренних ракурсов” $R_k(\varepsilon_1, \varepsilon_2, \dots, \varepsilon_{1A})$ где K_L – порядок конечной группы L_{fin} , индекс k пробегает диапазон значений $k = 1, \dots, K_L$, а $\varepsilon_1, \varepsilon_2, \dots, \varepsilon_A$ – *локальные координаты* в микрообласти, определенные как

$$\varepsilon_k = \eta_k - \xi_k \quad (6),$$

где $\eta_1, \eta_2, \dots, \eta_A$ – “бегущие” глобальные координаты, являющиеся аргументами $I_O(\eta_1, \eta_2, \dots, \eta_A)$, аналогичные координатам $\xi_1, \xi_2, \dots, \xi_A$, используемым для параметризации локальной области. При этом

$$R_k(\varepsilon_1, \varepsilon_2, \dots, \varepsilon_A) = g_k(\xi_1, \xi_2, \dots, \xi_A) I_O(\eta_1, \eta_2, \dots, \eta_A) \quad (7)$$

т.е. каждый из “внутренних ракурсов” получается путем действия параметрически определенного в точке $\xi_1, \xi_2, \dots, \xi_A$ оператора g_k из группы L_{fin} .

.....

Все оценки (5) локальные, вычисляемые по полной системе K_L “внутренних ракурсов”. Одним из естественных способов формирования разнообразных оценок типа (5), взятых из арсенала классической математической статистики, является дисперсионный анализ. В его однофакторной схеме проверяется “нулевая гипотеза” о том, является ли (2) инвариантом относительно преобразований из группы L_{fin} , причем оператор $g_k(\xi_1, \xi_2, \dots, \xi_A)$ из группы L_{fin} рассматривается как фактор, предположительно влияющий на значения функционала $\Psi(I_O, \eta_1, \eta_2, \dots, \eta_A)$ и Ψ будет зависеть от индекса k т.е.

$$\Psi_k(\eta_1, \eta_2, \dots, \eta_A) = \Psi(g_k I_O, \eta_1, \eta_2, \dots, \eta_A) \quad (8)$$

Исходное изображение $I_O(\eta_1, \eta_2, \dots, \eta_A)$ в локальной области “расслаивается” на K_L “ракурсов” (в терминологии дисперсионного анализа – “групп данных”) $R_k(\varepsilon_1, \varepsilon_2, \dots, \varepsilon_A)$ для которых вычисляются “межгрупповая” и “общая внутригрупповая” дисперсии D_{inter} и D_{comm} . Если дисперсионное отношение Фишера

$$F(\xi_1, \xi_2, \dots, \xi_A) = D_{inter} / D_{comm} \quad (9)$$

значимо отклоняется от единицы, то гипотеза отвергается. Поскольку отношение (9) параметрически зависит от координат $\xi_1, \xi_2, \dots, \xi_A$, оно может служить для покомпонентной оценки разнообразных “смысловых полей”, представленных в форме “вторичных” (результатирующих) изображений в пространстве S_C .

В данной главе предложены также методы решения томографических задач с локальной группой Ли путем введения “расширенной группы преобразований объекта контроля”, в которой его “внешние ракурсы” (например, рентгеновские проекции) и “внутренние ракурсы” формально равноправны. “Расширенная группа” является прямым произведением для соответствующих групп “внешних” и “внутренних” ракурсов. Например, для томосинтеза она может быть представлена как

$$G_{ext}(x, y, z) = ST(z) * L(x, y) \quad (10),$$

где $ST(z)$ – обычная “симметрическая” группа для “внешних ракурсов”, перенесенных в слой с глубиной залегания z (т.е. это группа перестановок проекций), а $L(x, y)$ – локальная группа для восстанавливаемого элемента изображения слоя с координатами (x, y, z) , операторы которой действуют в окрестности данного элемента на совмещенные с ней окрестности всех “калиброванных” таким образом проекционных изображений для данного слоя. Если порядок группы $L(x, y)$ (при ее трактовке как конечной группы) равен N_{in} , то для каждой окрестности такого проекционного изображения появляется N_{in} , “внутренних ракурсов”, а полное количество ракурсов для реконструкции элемента изображения с координатами (x, y, z) будет равно $N_{out} * N_{in}$. Таким образом, при “направленной реконструкции” общее количество ракурсов резко увеличивается, что позволяет преодолеть первоначальную некорректность задачи. Схема (10) используется для локальной поэлементной реконструкции в двух вариантах. В первом из них предположение о группе $L(x, y)$ используется как обычная (т.е. “непроверенная”) априорная информация. Задача решается на основе “локальной структурной регуляризации”, однако решение не “застраховано” от появления артефактов. Во втором варианте проверяется статистическая гипотеза о локальной группе. Такой подход предпочтительнее. Избыточность “локальных ракурсов” требует для применения в обоих вариантах “мягких” статистических моделей.

Кроме того, в данной главе предложены теоретико-групповые методы реконструктивной вычислительной диагностики эволюционирующих объектов. Развита структурный подход к эволюционирующему объекту, как к устойчивому целому. Предложено и обосновано применение известных стробоскопических методов регистрации данных в системах вычислительной диагностики для реконструкции эволюционирующих объектов. Решена проблема ка-

либровки неточных ритмов эволюционирующих объектов и введено понятие фазового времени. Развита методика стробоскопической реконструктивной диагностики в фазовом времени. Рассмотрены основные типы “статических” и “динамических” задач при реконструкции инвариантных характеристик эволюционирующих объектов. В рамках структурных методов обсуждены вопросы формализации “нормы” контроля и выявления аномалий, как понижения симметрии фона под воздействием внешних факторов

Рассмотрены перспективы развития теоретико-групповых статистических методов реконструкции в том случае, когда многообразия μ не являются римановыми, а также возможности использования для целей реконструкции локальных конечных групп, не имеющих прототипов в дифференциальной геометрии.

В третьей главе обсуждено применение пространственной фильтрации с локальной группой преобразований к контролю строительных конструкций (в рамках программы по разработке методов радиационного контроля строительных конструкций, осуществлявшейся в течение ряда лет в Федеральном институте по контролю и исследованию материалов в Берлине (Bundesanstalt für Materialforschung und –prüfung, “BAM-Berlin”) при технической поддержке Fuji Film Europe (Дюссельдорф, Германия). В задаче томографической реконструкции внутреннего строения железобетонной стены с ограниченным доступом (участок старого моста) для регистрации радиографических проекций использовались источник излучения на основе ^{60}Co и фотолюминесцентные экраны с биомедицинской системой “BAS2000” (Fuji Film). Геометрия подсистемы измерения проекционных данных – копланарная (как в классическом томосинтезе). Было зарегистрировано 14 проекционных изображений. Проекции размером 400×800 мм регистрировались на сдвоенных фотолюминесцентных экранах, размером 400×800 мм. Пространственное разрешение – 10 пар лин./мм. Толщина стены – 400 мм. Расстояние от экрана до плоскости источника – 1000 мм. Источник последовательно смещался вдоль прямой линии в плоскости источника (с шагом 200 мм) в направлении, перпендикулярном стальным стержням в железобетоне.

В качестве математического метода томографической реконструкции стены нелинейный томосинтез был вполне адекватен, однако благодаря шумам, вызываемым рассеянным излучением, потребовались существенно новые методы предобработки проекций. Предложенный для этой цели метод структурно-ориентированной фильтрации, основанный на выявлении “локальной диссимметрии”, оказался успешным. При разнообразии вариантов методы этого типа часто можно представить в традиционной форме алгоритма пространственной фильтрации со “скользящим окном” – локальной областью, в которой решаются задачи реконструкции “в конечном малом”.

В строительных конструкциях элементы, отвечающие за определенные структурно-функциональные связи, представляют собой протяженные образования. Им соответствует и определенная материальная субструктура (арматура в бетоне). Если такие структурные элементы не дают вклада в проекционное локальное изображение внутри окна, то данное изображение в пределах статистической значимости уместно считать изотропным. В противном случае возникают значимые отклонения от изотропности, отождествляемые с инцидентностью структурного элемента центральному элементу микроизображения. В данном случае группой локальной симметрии L_S (теоретико-групповым фильтром) служит группа вращения (называемая также группой $SO(2)$) локального изображения вокруг центрального элемента. Она описывает фон, “пустое пространство” без сигнала. Естественно в реконструктивном алгоритме она заменяется своей конечной подгруппой.

Все элементы исходного изображения, являющиеся центрами локальных микроизображений и удовлетворяющие локальной изотропии, рассматриваются как эквивалентные. Напротив, статистически значимая анизотропия свидетельствует о появлении *смыслового сигнала* (структурного элемента, например, арматуры, в других случаях *дефекта*, допустим фрагмента трещины и т.п.). Здесь применимы слова П. Кюри “диссимметрия творит явление”. 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 структурного элемента, как альтернативная гипотеза.

Рассмотрен один из алгоритмов распознавания анизотропии этого класса (с вычислительными затратами близкими к минимальным). В нем все выборочные статистики вычисляются на некоторых подмножествах локального изображения, а именно вдоль прямых линий, проходящих через центральный элемент. Выбираются N различных фиксированных направлений, соответствующих N группам данных для этих подмножеств. Скользящее окно предполагается квадратным с полушириной M . Пусть p_{ij} и r_{ij} – яркости элементов исходного и итогового изображений ($i=1, 2, \dots, I$, $j=1, 2, \dots, J$, 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 опускаются. Параметр n рассматривается как фактор, предположительно влияющий на средние значения $a_1, a_2, \dots, a_N$. В соответствии с основными принципами дисперсионного анализа (см. (8), (9)) может быть построена статистика (F – отношение Фишера, т. е. межгрупповая дисперсия, поделённая на общую внутригрупповую) с $N-1$ и $N(2M-1)$ степенями свободы (11), описывающая итоговое изображение. Точнее, к полученной формуле применяется некоторое нелинейное преобразование $r_{ij} = f(F_{ij})$ типа "look-up-table" так, чтобы обеспечить приемлемую для человеческого глаза гистограмму яркости.

$$F = \frac{N(2M-1)}{(N-1)2M} \frac{\sum_{n=1}^N \left(a_n - \frac{1}{N} \sum_{l=1}^N a_l \right)^2}{\sum_{n=1}^N (q_n^2 - a_n^2)} \quad (11)$$

Итоговое изображение, таким образом, "рисуеться" статистикой Фишера, являющейся в данном случае мерой различия между средними по различным направлениям. Иными словами, в данном подходе предполагалось, что та же

самая статистика, на основе которой отвергается или принимается гипотеза, может быть использована как количественная мера отклонения от точной симметрии (здесь от изотропии) и служить как характеристика яркости результирующего изображения. На рис. 1 представлены результаты структурно-ориентированной фильтрации с привлечением оценки дисперсионного анализа при $N=4$ и $M=32$.

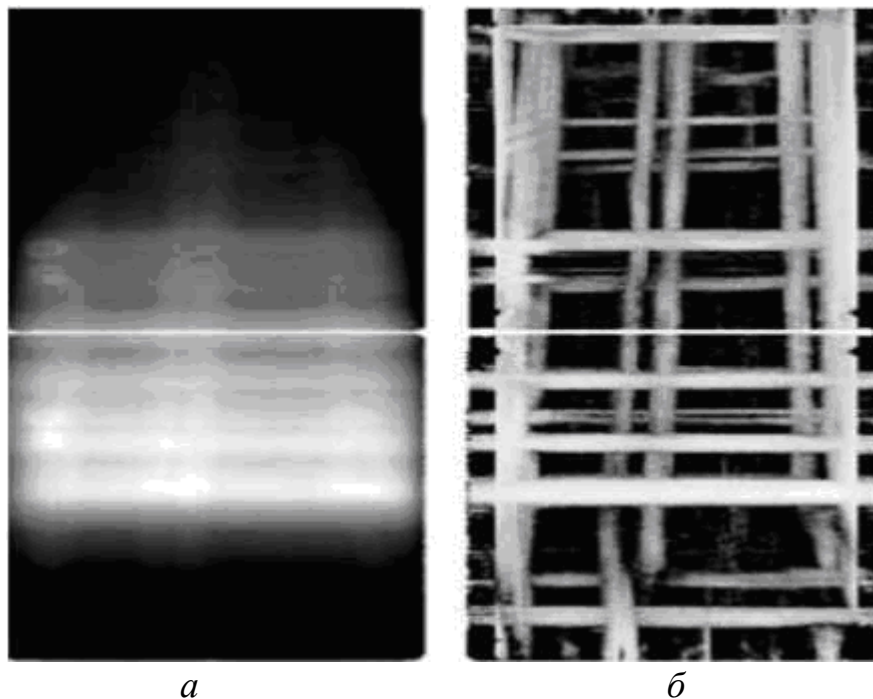


Рис. 1. Структурно-ориентированная фильтрация проекции железобетонной стены. Проекция: а) исходная; б) отфильтрованная

“Черное” на фильтрованной проекции справа соответствует тем областям, где нулевая теоретико-групповая гипотеза (в данном случае предположение об изотропности микроизображения в локальном пятне вблизи исследуемого центрального элемента) не отвергается. Напротив, “белое” – это свидетельства статистики Фишера о неправомерности нулевой гипотезы при различных уровнях значимости.

При контроле железобетонных конструкций структурно-ориентированная фильтрация полностью (даже без осуществления томографии) решает практическую проблему, поставленную заказчиком, т. е. инженерами-строителями, осуществляющими надзор за сооружениями. Соответствующая математическая задача – некорректная в острой форме, когда даже сам

.....

“оператор размытия” исходного незашумленного изображения если и известен, то весьма приблизительно. Фактически, в качестве его параметра использовалась только полуширина окна M . Разными авторами предпринимались также попытки решить эту задачу (фильтрацию предельно зашумленных проекций) на основе хорошо известных и новых методов обработки изображений (модифицированная инверсная фильтрация, процедуры, основанные на соображениях теории фракталов, “*Wavelets*” и т. д.), однако они не привели к позитивному результату. В исходном проекционном изображении содержится еще много другой смысловой информации, которую можно выявить, меняя ключевую группу L_S . Можно, например, визуализировать текстуру грануляции бетона, если бы такая задача была практически актуальной.

Далее в гл. 3 подробно обсуждены следующие аспекты теоретико-групповых статистических методов реконструкции изображений: 1) Упрощенные алгоритмы распознавания локальной анизотропии; 2) Формирование карт расположения структурных элементов; 3) “Материальная” и структурно-функциональная реконструкция объекта контроля; 4) Симметрические аспекты принципа причинности в статистических теоретико-групповых методах реконструкции изображений; 5) Структурная норма и структурно-функциональные связи в объекте контроля; 6) Теоретико-групповой статистический подход к трактовке понятия “дефект”; 7) Составная теоретико-групповая гипотеза и карта дефектности; 8) Информационная избыточность структурно-функциональных связей и их статистическая поддержка; 9) Теоретико-групповая фокусировка информации в алгоритмах реконструкции; 10) Теоретико-групповые статистические методы распознавания семантической (смысловой) информации в объектах контроля и информационных потоках; 11) Теоретико-групповая формализация смыслов путем их представления своими группами автоморфизмов; 12) Ошибки 1-го и 2-го рода в распознавании “смысловых структур”; 13) Структурно-ориентированная и “структурно-адаптивная” реконструкция; 14) Методы покомпонентной визуализации “смысловых полей”; 15) Визуализация объекта исследования и его теоретико-групповая концептуализация.

В четвертой главе рассмотрены возможности нелинейного обратного проецирования и нелинейного томосинтеза. С томосинтезом часто связывают

“ламинографию” т.е. метод послойной визуализации объекта контроля по его нескольким рентгеновским проекциям. В современном его понимании (при его преимущественно цифровых реализациях) “послойность” вовсе не является определяющим фактором. Скорее, это вариант “малоракурсной томографии” с малым “углом томографирования” т.е. с ограниченным доступом к объекту контроля. Такие задачи в НК разнообразны, всегда востребованы и трудны. Их решение требует привлечения существенно нелинейных методов.

Концепция обратного проецирования, основанная на “суммационных” оценках $T(x, y, z) = (P_1 + P_2 + \dots + P_N) / N$ решения реконструктивных задач (где $P_1, P_2, \dots, P_N$ – луч-суммы, инцидентные точке x, y, z) является одной из старейших и, в то же время одной из наиболее жизнеспособных в томографии. Несмотря на обилие новых реконструктивных алгоритмов, наиболее часто употребляемые среди них это модификации метода обратных проекций, осуществляемые путем внесения в эту базовую оценку различных процедур фильтрации — предобработки проекций и постобработки томограмм (таких, например, как “метод обратных проекций с фильтрацией сверткой” и многие другие). К сожалению, они непригодны для решения малоракурсных задач. Автором диссертации была осуществлена более радикальная модификация классического обратного проецирования за счет смены самой базовой оценки на нелинейную

$$T(x, y, z) = f(P_1, P_2, \dots, P_N) \quad (12),$$

где функция f инвариантна относительно любых перестановок своих неотрицательных аргументов. Дальнейшее совершенствование методов (12) также достигается за счет процедур фильтрации, среди них алгоритмов фильтрации с локальной группой. В гл. 4 рассмотрено несколько классов оценок нелинейного обратного проецирования типа (12), в особенности порядковых статистик

$$T(x, y, z) = S_k(P_1, P_2, \dots, P_N) \quad (13)$$

и частного случая (13) при $k = 1$ – “метода минимальных проекций”

$$T(x, y, z) = \min(P_1, P_2, \dots, P_N) \quad (14)$$

Возможности томосинтеза с оценками нелинейного обратного проецирования можно оценить, рассматривая следующий пример послойного восстановления по двумерным проекциям. На рис 2 представлены результаты чис-

ленного 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.

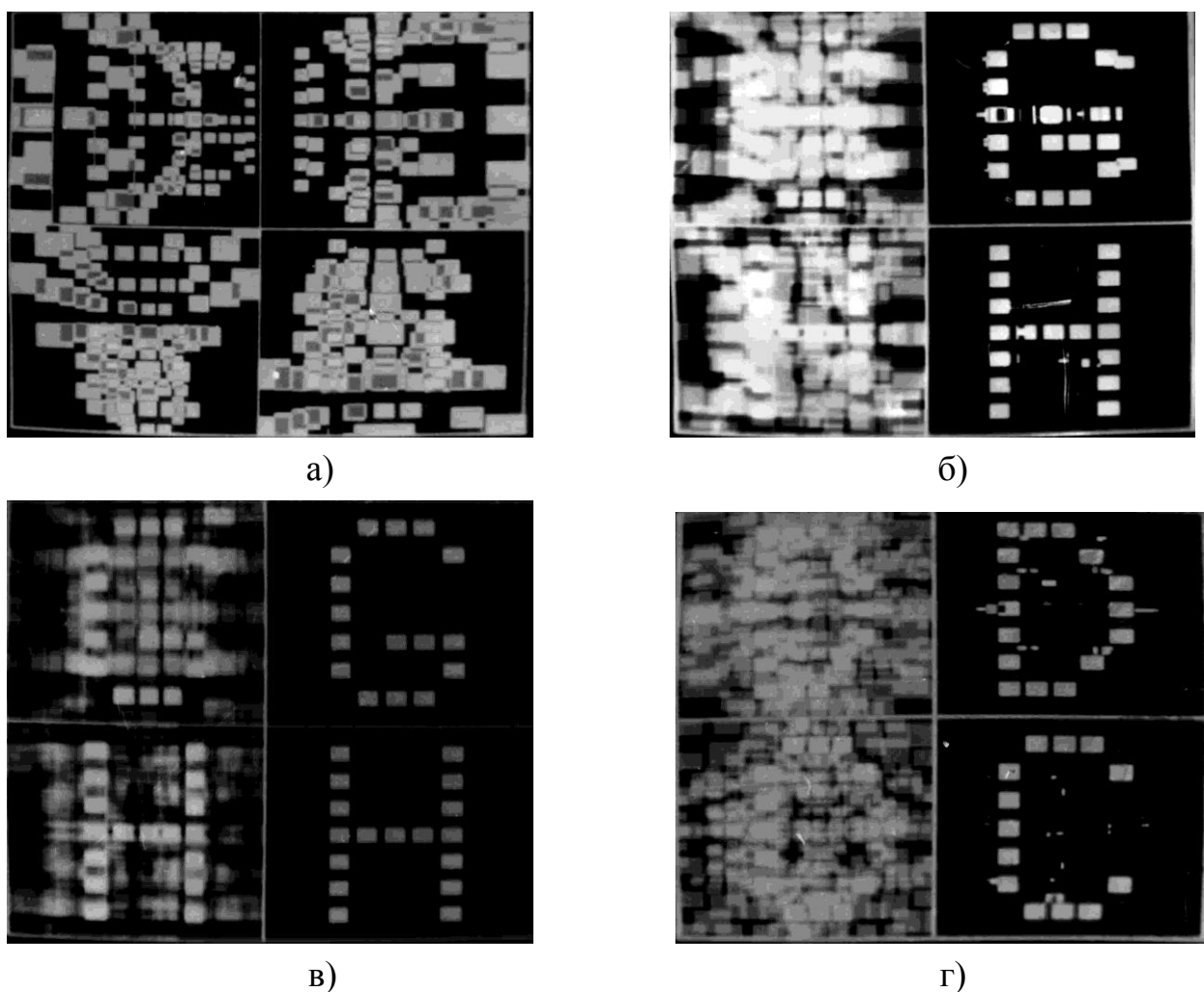


Рис. 2. Сравнение классического метода обратных проекций с методом минимальных проекций.

На рис.2а показаны четыре “тенеграммы” — результаты “просвечивания” объекта контроля с четырех позиций. На рис. 2б представлены результаты восстановления для двух слоев по четырем проекциям. Слева — по классическому методу обратных проекций (1). Справа — по “методу минимальных проекций” На рис. 2в представлены результаты восстановления для тех же самых слоев по 8 проекциям (помехи отсутствуют). На рис. 2г можно видеть результаты восстановления для двух других слоев объекта по 4 проекциям.

Предложен и подробно рассмотрен вариационный подход к оценкам нелинейного обратного проецирования на классе нелинейных усреднений. В частности показано, что при оценке (14) достигается минимум нормы квадратичного функционала невязок для системы исходных проекционных интегральных уравнений томографической задачи. Исследованы также связи “метода минимальных проекций” с известными реконструктивными методами “проецирования на выпуклые множества”

В пятой главе рассмотрены вопросы программно-аппаратной реализации “нелинейного томосинтеза” и других систем РВД для НК. Отмечена важная роль аппаратной предобработки проекционных изображений, в частности путем аналого-цифрового накопления изображений. На основе опыта создания систем томосинтеза обсуждены также возможности различных детекторов излучения для целей РВД (рентгеновская пленка, термолюминесцентные экраны и пр.). Исследована эволюция программно-аппаратных комплексов, как “двухуровневых систем” и, в связи с этим, возможности разработки “гибких информационных технологий” РВД.

Особое внимание уделено “бетатронной томографии” – систем нелинейного томосинтеза для НК с использованием малогабаритных бетатронов в качестве источников излучения. В предыдущем примере проекционные данные незашумлены. Для иллюстрации возможностей нелинейного томосинтеза при работе с реальными, сильно 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 неразрушающего контроля (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 был равен 45°. (Кассета с пленкой поворачивалась вместе с объектом). Фокусное расстояние было равно 890 мм, расстояние от источника излучения до оси вращения — 250 мм. Проекционные изображения на пленках оцифровывались при помощи автоматического микроденситометра. На рис.3 представлены 8 нефильтрованных радиографических проекций объекта.

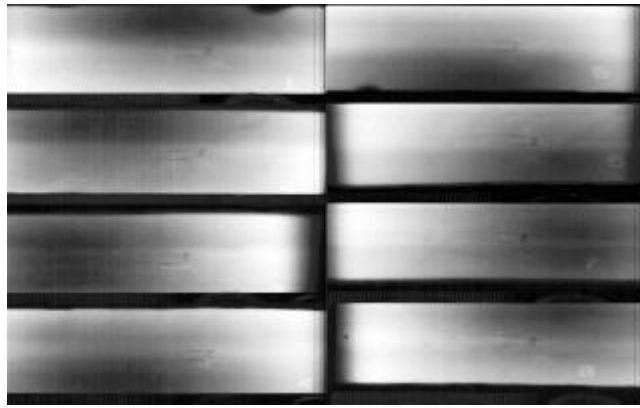


Рис. 3. Радиографические проекции стального слитка. .

На рис .4 – рис. 6 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 нелинейного обратного проецирования использовался аналог 2-й порядковой статистики, 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.

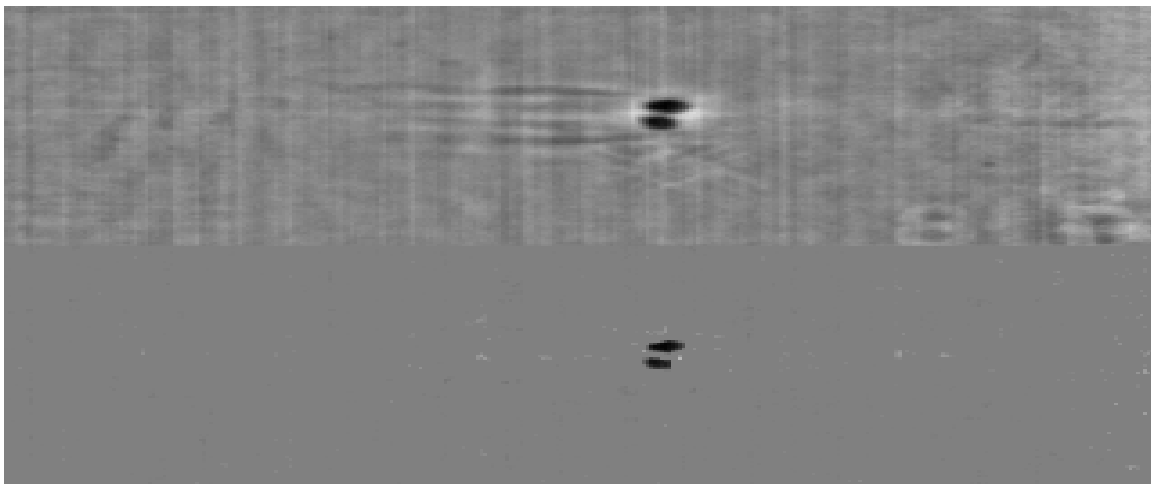


Рис. 4. Томограммы для слоя с глубиной залегания $Z = 0.34$.

Сравнение результатов, полученных двумя методами, позволяет оценить преимущества нелинейного томосинтеза . Синтез по классическому методу обратных проекций дает большое количество артефактов (превосходящих по ам-

плитуде полезный сигнал), что не обеспечивает надежную диагностику. Синтез по нелинейному методу с соответствующим типом фильтрации и выбором параметров оценок нелинейного обратного проецирования позволяет сразу же отсеять большой объем ненужной информации (в частности, информацию о низкочастотной составляющей проекций) и радикально упростить ситуацию, не нарушая структуры дефектов.

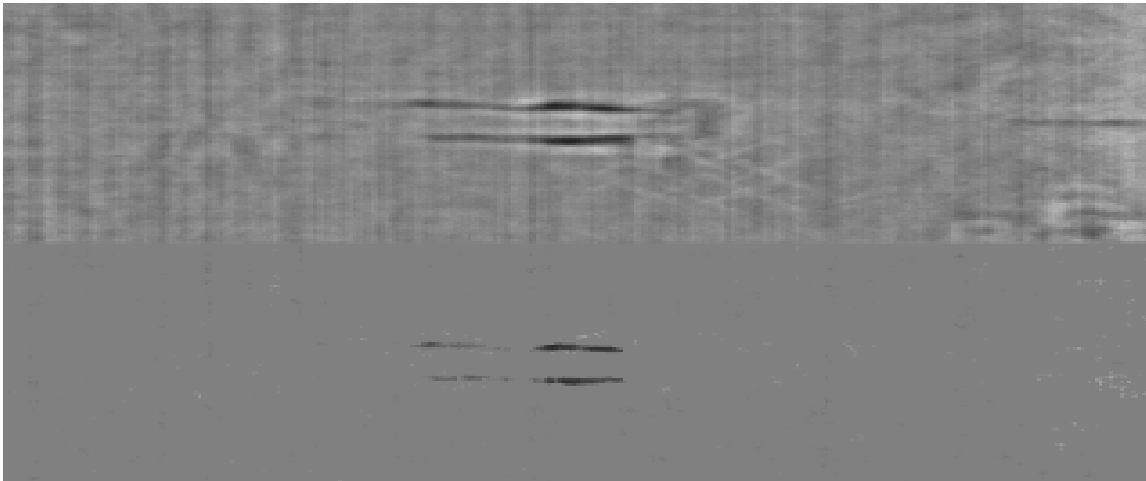


Рис. 5. Томограммы для слоя с глубиной залегания $Z = 0.61$.

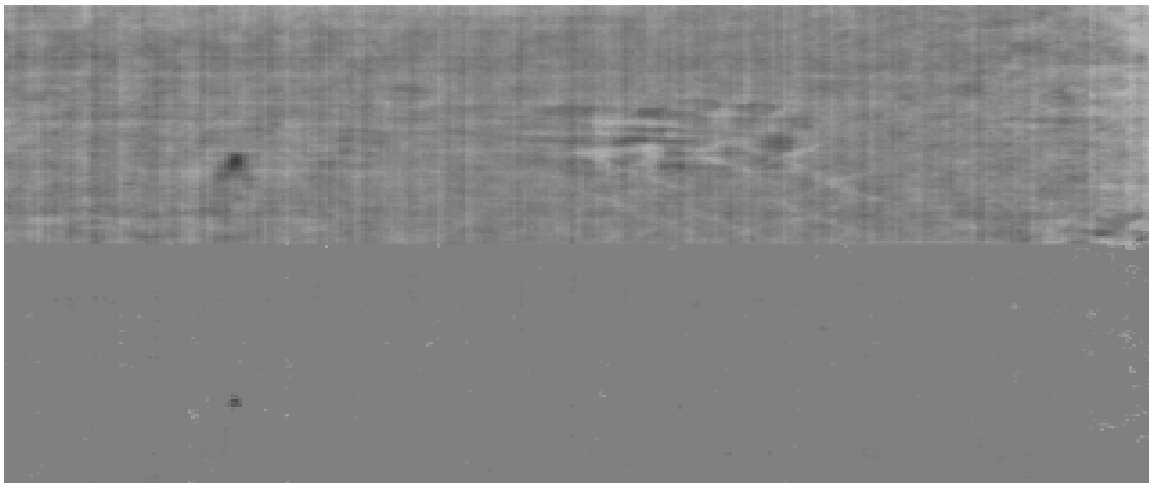


Рис. 6.. Томограммы для слоя с глубиной залегания $Z = 0.85$.

Томограммам на рис.4, рис.5 и рис.6 соответствуют глубины залеганий $Z = 0.34$, $Z = 0.61$ и $Z = 0.85$, которые даны в относительных единицах ($Z = 0.0$ соответствует метке на нижней стороне объекта и $Z = 1.0$ – на верхней).

Фактически, томограммы по нелинейному томосинтезу 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 перенасыщена “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.

В шестой главе обсуждены проблемы радиационного томографического контроля объектов ядерной энергетики в процессе их эксплуатации на основе структурно-ориентированных методов РВД. Подчеркнута чрезвычайная актуальность проблемы и отсутствие в настоящее время адекватных методов ее решения. Исследованы возможности радиографических методов НК с последующей томографической реконструкцией для визуализации зон формирования трещин в деталях и узлах объектов ядерной энергетики в процессе их функционирования.. В отличие от классических задач ВТ, где решением служит распределение $\mu(x, y, z)$, эта задача существенным образом зависит от ориентации микротрещин т.е. решение может быть выражено как $M(x, y, z, \theta, \varphi)$, где θ и φ - характеризующие положение микротрещины углы Эйлера. В общем случае такие задачи не решаются, более того, в математических методах традиционной ВТ такие объекты как микротрещины и мелкие трещины попадают в “множество меры ноль”, поэтому методами ВТ они не обнаруживаются. Задачу все-таки можно решать, если учесть преимущественную ориентацию микротрещин в контролируемой детали. Поскольку фактор, приводящий к анизотропии не является точно ориентированным, а имеет угловой разброс, то в соответствии с принципом П.Кюри, такой же угловой разброс характерен и для распределений микротрещин. При радиографическом исследовании сварных швов зона формирования трещин бывает видна в диапазоне углов θ до 10° и более. Благодаря ненулевой дисперсии по углам θ ($-\theta_{max} \leq \theta \leq \theta_{max}$) между реальными ориентациями $\mathbf{n}(x, y, z)$ микротрещин и $\mathbf{N}(x, y, z) = \text{const}$ (для которого $\theta=0$) становится доступным набор разноразмерных проекций для томографии.

Тем не менее, и в такой постановке задача резко отличается от типичных задач ВТ. Допустим, число проекций равно K . Тогда на луч-суммах для K различных лучей, занумерованных индексом k ($k = 1, \dots, K$), проходящих через одну и ту же точку (x, y, z) зоны, представлены проекционные вклады от микротрещин с разными ориентациями. В луч-сумму вносят вклад только те микротрещины на пути луча, для которых $\mathbf{n}(x, y, z)$ перпендикулярно направлению луча. В этих условиях ситуация, когда все K лучей могут одновременно “коснуться” какой-то определенной микротрещины, крайне маловероятна (с учетом того, что для хорошей обусловленности задачи источники излучения должны быть выстроены преимущественно перпендикулярно трещинам т.е. вдоль вектора $\mathbf{N}(x, y, z)$). Иначе говоря, здесь (в противоположность ВТ) между луч-суммами фактически нет “материального пересечения”, что лишает основы и томографическую визуализацию.

Выход из создавшейся ситуации может быть найден (и недостающая для решения томографической задачи информация может быть восполнена) за счет предположения о том, что между проекционными вкладами от микротрещин разной ориентации существует статистическая связь, так, что вклад от одной ориентации вероятностно характеризует и вклады от всех других. Это может быть сформулировано более определенно как предположение о пространственной однородности угловых распределений микротрещин в зоне формирования трещин. Поскольку возникшие в результате воздействия новые пониженные симметрии являются неточными, о пространственной однородности можно говорить только в статистическом смысле. Выразим это в форме теоретико-групповой статистической гипотезы.

$$w(x, y, z, \theta, \varphi) \approx W(\theta, \varphi) \quad (15)$$

Здесь $W(\theta, \varphi)$ некоторое “общее” для зоны распределение микротрещин по ориентациям, $w(x, y, z, \theta, \varphi)$ – распределение в некоторой окрестности точки (x, y, z) , а значок “ $\approx$ ” следует понимать как статистическое согласие законов распределения для определенного уровня значимости ε при произвольных (x, y, z) и при всех допустимых размерах окрестностей. В си-

лу изотропности воздействующего фактора относительно любой оси, параллельной $N(x, y, z)$, соответствующая симметрия (определяемая группой $SO(2)$) свойственна и распределению $W(\theta, \varphi)$, иными словами, оно не зависит от φ и может быть представлено как произведение двух нормированных распределений (отдельно по θ и по φ) в форме $W(\theta)(1/2\pi)$. В свою очередь оценки для распределения $W(\theta)$ могут быть получены различными способами непосредственно из проекционных данных. В частности, возможна аппроксимация $W(\theta)$ нормальным распределением с использованием известного углового разброса $(-\theta_{max} \leq \theta \leq \theta_{max})$ для оценки дисперсии.

Таким образом, несмотря на то, что природа томографической реконструкции $M_{ceff}(x, y, z)$ по луч-суммам со слабым (или вовсе отсутствующим) “материальным пересечением” совсем другая, чем в ВТ, условие (15) дает возможность осуществлять ее на основе “регулярных” алгоритмов ВТ или нелинейного томосинтеза.

При этом $M_{ceff}(x, y, z)\Delta x\Delta y\Delta z$ описывает “количество микротрещин” всевозможных ориентаций в объеме $\Delta x\Delta y\Delta z$, а размеры $\Delta x, \Delta y, \Delta z$ элементарного объема много больше размеров типичной микротрещины и сравнимы с размерами одного пикселя на проекционном изображении. На самом деле, в $M_{ceff}(x, y, z)$ вносят вклад и мелкие неопасные трещины. Проблема разделения в радиационном контроле массивов микротрещин ниже критического радиуса и мелких трещин очень сложная и до сих пор не решенная.

При контроле компонент АЭС были испробованы многие методы и “нелинейный томосинтез” в сочетании со структурно-ориентированной предобработкой дал обнадеживающие результаты. Более всего была исследована проблема обнаружения трещин в сварных швах трубопроводов атомных электростанций, наполненных теплоносителями.



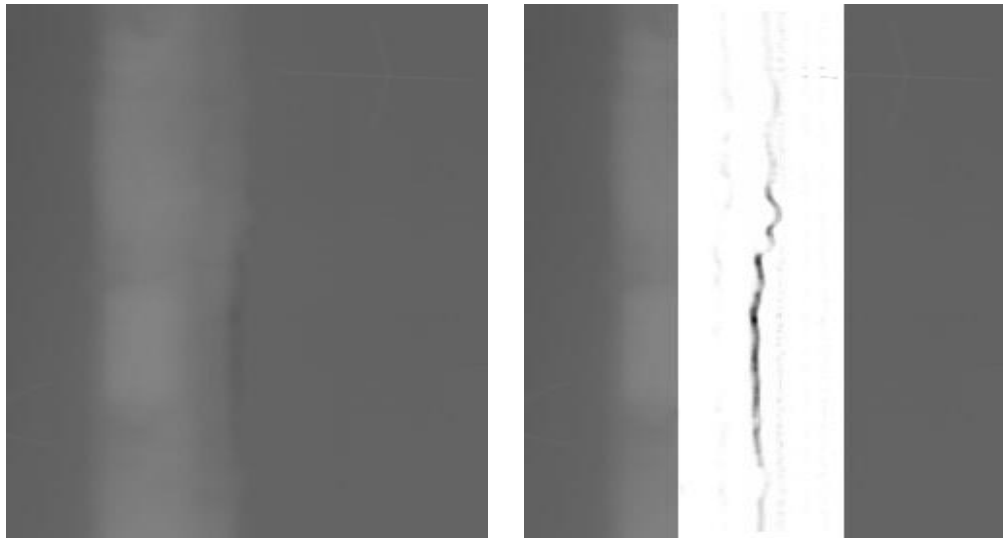
Рис. 7. Объект контроля — наполненная водой труба из аустенитной стали со сварным швом. Диаметр трубы — 140 мм и толщина ее стенки — 13 мм.

Геометрически, проекции (Рис. 8) представляют собой развертки цилиндра (низ проекционного изображения совпадает с его верхом). Для регистрации проекций разработано сканирующее устройство со специализированной строчной радиометрической ПЗС-камерой фирмы BIR. Использовалась рентгеновская трубка с напряжением 225 кВ, при этом камера и трубка расположены относительно контролируемой трубы в диаметрально противоположных позициях т.е. при вращении устройства вокруг трубы разведены на 180° .

Для визуализации зон формирования трещин применялись структурно-ориентированные алгоритмы со “скользящим окном” типа (11). Присущее им тонкое выделение структурных элементов зоны 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.

На рис. 8б представлены результаты структурно-ориентированной фильтрации по (11) для ROI (region of interest, области интереса) одной из рентгеновских проекций сварного шва при $N=4$ и $M=32$. (Ширина ROI в пикселях близка к 600). “Белое” на фильтрованной проекции соответствует тем областям, где нулевая теоретико-групповая гипотеза (в данном случае предположение об изотропности микроизображения в локальном пятне вблизи исследуемого центрального элемента) не отвергается. Напротив, “черное” это

свидетельства статистики Фишера о неправомерности нулевой гипотезы при различных уровнях значимости. т.е. значимая локальная анизотропия.



а) Нефильтрованная проекция

б) Фильтрованная проекция

Рис.8. Структурно-ориентированная фильтрация рентгеновской проекции кольцевого сварного шва.

На рис. 9 представлено объемное изображение зоны формирования трещин, построенное 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 по трем проекциям, предобработанным по методу структурно-ориентированной фильтрации. Методы нелинейного томосинтеза существенны для интерпретации измерений, а новые процедуры структурно-ориентированной ОИ для выявления трещин и их морфологического анализа. Именно они в наибольшей степени обуславливают предсказательную ценность метода. Нелинейный томосинтез со структурно-ориентированной ОИ 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 глубины залегания отдельных фрагментов этих зон.



Рис. 9. Объемное изображение зоны формирования трещин

Проверка теоретико-групповых гипотез с применением разных вариантов статистических решений, включая оценки нелинейного обратного проецирования, позволяет дополнительно повысить надежность и гибкость структурно-ориентированных методов ОИ. Отметим также, что в рамках “геометрии в малом” статистический теоретико-групповой подход хорошо приспособлен и для решения неизбежных “чисто технических” проблем, например “отстройки” от низкочастотного фона исходных изображений.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Основные научные результаты диссертации

1. Предложен и развит теоретико-групповой статистический подход к решению обратных некорректных задач реконструкции объектов по неполной и зашумленной информации о них, позволяющих выявлять структурно-функциональные связи в объекте на основе статистических оценок инвариантов его группы автоморфизмов.
2. Предложен и разработан общий метод пространственной фильтрации зашумленных изображений, основанный на исследовании исходного изображения локальными группами Ли в рамках “геометрии в малом” и осуществляемый путем проверки для каждого элемента изображения статистической теоретико-групповой гипотезы о том, что заданная группа Ли является группой автоморфизмов локального изображения в окрестности данного элемента.
3. Предложен и разработан метод пространственной фильтрации зашумленных изображений, основанный на распознавании локальной анизотропии микро-изображения в “скользящем окне” просмотра данных, осуществляемый пу-

тем проверки для каждого элемента изображения статистической теоретико-групповой гипотезы об инвариантности микроизображения в окне относительно преобразований из группы $SO(2)$. Проверка гипотезы осуществляется на основе дисперсионного анализа и степень отклонения микроизображения от изотропии оценивается на основе дисперсионного отношения Фишера.

4. Показана применимость метода пространственной фильтрации зашумленных изображений с локальной группой $SO(2)$ для диагностики строительных конструкций и диагностики зон образования трещин в трубопроводах АЭС, заполненных теплоносителем.
5. Предложены и всесторонне исследованы оценки нелинейного обратного проецирования в томографии и их аналоги в ОИ. Разработан вариационный подход к нелинейному обратному проецированию, позволяющий получать оптимальные оценки. Выявлены связи между методом минимальных проекций и методами проекций на выпуклые множества. Раскрыта теоретико-групповая статистическая природа оценок нелинейного обратного проецирования.
6. Предложена, развита, теоретически обоснована и подтверждена на практике концепция “нелинейного томосинтеза”, включающая в себя взаимно согласованные методы нелинейного обратного проецирования и методы структурно-ориентированной ОИ, что позволило существенно расширить диапазон задач РВД, решаемых в НК и сделать нелинейный томосинтез одним из наиболее пригодных для массового применения в НК реконструктивных методов.
7. Показана применимость метода нелинейного томосинтеза для диагностики строительных конструкций, для диагностики зон образования трещин в трубопроводах АЭС, а также при разработке программно-аппаратного комплекса “Бетатронная томография” для контроля крупногабаритных изделий с использованием малогабаритного бетатрона.
8. На основе развитых автором статистических структурно-ориентированных методов пространственной фильтрации изображений предложен теоретико-групповой подход к трактовке понятия “дефект”. Локальная группа Ли в теоретико-групповых фильтрах использована в качестве инструмента для определения структурной нормы контроля. Рассмотрены методы распозна-

вания аномальных структурно-функциональных связей в объекте контроля и формирования его карты дефектности путем проверки составной теоретико-групповой статистической гипотезы.

9. Исследованы симметрические аспекты принципа причинности в алгоритмах пространственной фильтрации изображений с локальной группой Ли. Эти результаты являются развитием на статистической основе классического принципа диссимметризации П.Кюри, согласно которому группа симметрии результата воздействия является теоретико-множественным пересечением групп симметрии объекта и воздействующего фактора).
10. Предложены теоретико-групповые статистические методы разделения “существующих” в хаотическом объекте контроля (в “многоуровневой системе”) разнородных “смысловых полей”, инвариантных относительно преобразований из разных (и в общем случае несовместимых) групп Ли. На этой основе разработан метод “смысловой фильтрации” объекта исследования, когда в согласии со “своей” ключевой группой Ли выделяется совершенно определенная “смысловое поле”, а все остальные рассматриваются как смысловые помехи.
11. Предложен и разработан метод квазитомографической визуализации зон формирования трещин в объекте контроля под воздействием факторов, приводящих к преимущественной ориентации микротрещин.
12. Предложены теоретико-групповые статистические методы реконструкции эволюционирующих (“динамических”) объектов с управлением регистрации исходных данных естественными “внутренними” ритмами объекта.

Основное содержание диссертационной работы отражено в следующих публикациях, рекомендованных списком ВАК:

1. Баранов В.А., Чекалин А.С. Система цифрового томосинтеза для неразрушающего контроля // Дефектоскопия, 1988, 5, с. 30-36.
2. 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” // “NDT & E International”, 1997 Elsevier Science Ltd., Vol. 30, № 4, pp. 243-248.
3. Баранов В.А., Эверт У., Редмер Б. Томографическая визуализация зон образования трещин в компонентах атомных электростанций // Изв. Томского политехнического университета / Изд. ТПУ, 2008. – Том 312, № 2, стр. 299-311.
4. Кулешов В.К., Капранов Б.И., Баранов В.А. Концепция организации работы на базе НИИ ИН и кафедры ФМПК центра подготовки специалистов миро-

- вого уровня в области диагностики и неразрушающего контроля материалов, оборудования и окружающей среды // Изв. Томского политехнического университета / Изд. ТПУ, 2008. – Том 312, № 2, стр. 381-385.
5. Кулешов В.К., Бразовский В.В., Баранов В.А. Контроль параметров продуктов сгорания в фильтрационных установках // Известия Томского политехнического университета / Изд. ТПУ, 2009. – Том 315, № 4, стр. 29-34.
 6. Баранов В.А., Бразовский В.В., Кулешов В.К., Эверт У. Статистические теоретико-групповые методы обработки изображений // Изв. Томского политехнического университета / Изд. ТПУ, 2009. – Том 315, № 5, стр. 108-112.
 7. Баранов В.А., Бразовский В.В., Эверт У., Редмер Б. Структурно-ориентированная визуализация зон образования трещин в компонентах атомных электростанций // Естественные и технические науки, № 5, 2010, стр. 386-391.
 8. Бразовский В.В., Баранов В.А., Ивженко О.О., Кулешов В.К. Универсальный оптический метод контроля динамических дисперсных потоков // Естественные и технические науки, № 5, 2010, стр. 392-400.
 9. Баранов В.А., Бразовский В.В., Ивженко О.О., Эверт У. Структурно-ориентированный подход к обработке изображений // Естественные и технические науки, № 5, 2010, стр. 407-413.
 10. Баранов В.А., Эверт У. Статистический теоретико-групповой подход к трактовке понятия “дефект” // Дефектоскопия, 2011, № 10, с. 76-80.
 11. Баранов В.А., Эверт У., Редмер Б., Кренинг Х.-М., Бразовский В.В., Учайкина Е.С., Кулешов В.К. Нелинейное обратное проецирование в реконструктивных методах неразрушающего контроля // Дефектоскопия, 2011, № 10, с. 62-67.
 12. Baranov V.A., Ewert U. The Statistical Group-Theoretical Method for Treatment of the Notion of Defect // Russian Journal of Nondestructive Testing, 2011, Vol. 47, № 10, pp 707-709.
 13. Baranov V.A., Ewert U., Kröning H.-M., Brazovsky W.W., Uchaikina E.S., Kuleshov V.K. Nonlinear Backprojection in Reconstruction Nondestructive Testing Methods // Russian Journal of Nondestructive Testing, 2011, Vol. 47, № 10, pp 696-700.
 14. Баранов В.А., Эверт У., Кулешов В.К., Янушевская М., Тубалов Н.П. Формирование “карт дефектности” объекта контроля на основе статистических теоретико-групповых методов обработки изображений // Ползуновский вестник, 2011, №2, Часть 2, стр. 270-274.
 15. Баранов В.А., Эверт У., Кулешов В.К., Янушевская М., Тубалов Н.П. “Нелинейный томосинтез” как метод решения реконструктивных задач радиационного контроля // Ползуновский вестник, 2011, №2, Часть 2, стр. 275-279.
 16. Баранов В.А., Эверт У. Методы статистической пространственной фильтрации изображений на основе локальной группы преобразований // Дефектоскопия, 2012, № 2, с. 64-72.

17. Baranov V.A., Ewert U. Methods of Statistical Spatial Filtering of Images on the Basis of Local Group of Transformations // Russian Journal of Nondestructive Testing, 2012, Vol 48. № 2, pp 123-128
18. Баранов В.А., Эверт У. Симметрические аспекты принципа причинности в статистических теоретико-групповых методах реконструкции изображений // Дефектоскопия, 2012, № 3, с. 53-58.
19. Baranov V.A., Ewert U. Symmetrical Aspects of the Causality Principle in Statistical Group-Theoretical Image-Reconstruction Methods // Russian Journal of Nondestructive Testing, 2012, Vol 48. № 3, pp 187-190
20. Баранов В.А., Эверт У, Редмер Б., Кренинг Х.М. Квазитомографическая визуализация зон формирования трещин по радиографическим проекциям // Дефектоскопия, 2012, № 4, с. 64-59.
21. Baranov V.A., Ewert U., Redmer B., Kroening H.M. Quasi-Tomographic Visualization of Crack-Formation Zones using Radiographic Projections Methods // Russian Journal of Nondestructive Testing, 2012, Vol 48. № 4, pp 259-263.
22. Баранов В.А., Д.К. Авдеева Д.К., И.А. Лежнина И.А., Уваров А.А. Системы реконструктивной медицинской диагностики с управлением регистрации исходных данных биологическими ритмами человека // Контроль, Диагностика 2012, Специальный выпуск, стр. 88-94.
23. Баранов В.А., Эверт У. Теоретико-групповой статистический подход распознаванию и реконструкции “смысловых структур” в объектах контроля // Контроль, Диагностика 2013, № 13, стр. 127-133.
24. Баранов В.А., Авдеева Д.К., Пеньков П.Г., Южаков М.М., Максимов И.В., Балахонова М.В. Стробоскопические теоретико-групповые методы реконструктивной вычислительной диагностики эволюционирующих объектов // Контроль, Диагностика 2013, № 13, стр. 146-153.
25. Баранов В.А., Авдеева Д.К., Пеньков П.Г., Южаков М.М., Максиимов И.В, Балахонова М.В., Григорьев М.Г. Структурный подход к обратным задачам диагностики в кардиологии // Современные проблемы науки и образования. – 2013. – № 6; URL: <http://www.science-education.ru/113-11343> (дата обращения: 25.12.2013).
26. Baranov V.A., Ewert U. Symmetrical Aspects of the Causality Principle in Statistical Group-Theoretical Image-Reconstruction Methods // Публикация статьи из Russian Journal of Nondestructive Testing, 2012, Vol 48. № 3, pp 187-190 издательством “Шпрингер” как ‘Online First’ on SpringerLink
27. Baranov V.A., Ewert U., Redmer B., Kroening H.M. Quasi-Tomographic Visualization of Crack-Formation Zones using Radiographic Projections Methods // Публикация статьи из Russian Journal of Nondestructive Testing, 2012, Vol 48. № 4, pp 245-249 издательством “Шпрингер” как ‘Online First’ on SpringerLink

Статьи [12, 13, 17, 19, 21, 2] широко представлены в базах данных: Web of Science, Scopus, ResearchGate и др. Некоторые важные аспекты диссертационной темы отражены также в следующих публикациях:

1. Baranov V.A., Temnik A.K., Chakhlov V.L., Chekalin A.S. Betatron tomography with the use of non-linear backprojection techniques // In coll. of papers to International Symposium on Computerized Tomography for Industrial Applications, Berlin, 1994, pp. 271-277.
2. 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, pp. 88-95.
3. V. Baranov, V. Chakhlov, M. Kröning, W. Morgner. 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, pp. 1287-1291.
4. 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, 22-24 Mai, 1995, P6, S. 471-475.
5. Baranov V.A. A Variational Approach to Non-Linear Backprojection // "Computerized Tomography", coll. of papers, Novosibirsk – Utrecht, Editor-in-Chief: M.M. Lavrent'ev, 1995 Utrecht, the Netherlands, pp. 82-97.
6. Ewert U., Baranov V., Redmer B. Digitale Laminographie — Anwendungen an Stahlbetonkonstruktionen. — Das 33. Forschungskolloquium "Deutscher Ausschuss für Stahlbeton", Bundesanstalt für Materialforschung und —prüfung (BAM), Berlin-Dahlem, 1996, B 33, S. 118-125.
7. Ewert U., Redmer B., Müller J., Trobitz M (Berlin), Baranov V (Tomsk, RUS). Mechanisierte Urchstrahlprüfung von Rundschweißnähten — Prüfung mediengefüllter Rohrleitungen und Tiefenlagebestimmung durch Tomosynthese // 23. MPA-Seminar "Sicherheit und Verfügbarkeit in der Anlagentechnik" mit dem Schwerpunkt "Verhalten von druckführenden Komponenten und Systemen bei erhöhten Belastungen", Staatliche Materialprüfungsanstalt (MPA), 1997 Universität Stuttgart, Band 23, SS. 13.1-13.14.
8. 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 Non-destructive Testing and Diagnostics (CM NDT-98)", Minsk, 1998, pp. 441-448.