

На правах рукописи

Змызгова Татьяна Рудольфовна

**МАТЕМАТИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ И АЛГОРИТМЫ КОМПЬЮТЕРНОЙ  
ОБРАБОТКИ ЦИФРОВЫХ ИЗОБРАЖЕНИЙ РЕАКЦИИ ДАТЧИКОВ  
ДЕФОРМАЦИИ ИНТЕГРАЛЬНОГО ТИПА**

05.13.18 – математическое моделирование,  
численные методы и комплексы программ

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Тюмень – 2007

Работа выполнена на кафедре технологии и автоматизации сварочного производства ГОУ ВПО Курганский государственный университет

Научный руководитель: заслуженный деятель науки РФ,  
доктор технических наук, профессор  
Сызранцев Владимир Николаевич

Официальные оппоненты: доктор технических наук, профессор  
Шапцев Валерий Алексеевич  
доктор физико-математических наук, профессор  
Борзых Владимир Эрнестович

Ведущая организация: Институт механики ИжГТУ (г. Ижевск)

Защита диссертации состоится 13 ноября 2007 года в 16 часов на заседании диссертационного совета К212.274.01 при Тюменском государственном университете по адресу: 625003, г. Тюмень, ул. Перекопская, 15А, ауд. 217.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Тюменского государственного университета.

Автореферат разослан 9 октября 2007 года.

Ученый секретарь  
диссертационного совета

Бутакова Н.Н.

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность темы.** Один из новых подходов к диагностике усталости различных деталей, узлов и конструкций машин базируется на обработке информации, полученной при помощи датчиков деформации интегрального типа (ДДИТ), которые представляют собой новые средства экспериментального исследования. Существенный вклад в развитие данного научного направления внесли В.Н. Сызранцев, А.С. Терехов, А.Ю. Розенберг, Д.А. Троценко, А.Ю. Удовикин, С.Л. Голофаст, О.А. Штин и др.

Интенсификация научных исследований требует широкого применения и развития существующих методов хранения, обработки и анализа экспериментальной информации, полученной при помощи ДДИТ, на базе современных вычислительных средств. Осуществление сложных методов обработки изображений реакции ДДИТ в режиме реального времени требует применения эффективных базовых моделей (фильтрации, идентификации), экономично использующих соответствующие технические ресурсы. Таким образом, в настоящее время существует достаточно важная научно-техническая проблема разработки эффективных моделей и устройств эффективной формализации и анализа изображений реакции ДДИТ в рамках единой автоматизированной системы обработки изображений их реакции.

**Целью работы** является синтез математических моделей и алгоритмов эффективной формализации изображений реакции ДДИТ, которые позволят решать задачи оценки нагруженности и прогнозирования усталостной долговечности деталей и конструкций машин при стендовых и эксплуатационных испытаниях.

Для достижения поставленной цели в диссертации автором были поставлены следующие **задачи**:

1. Рассмотреть различные модели шумовых воздействий и провести сравнительный анализ известных моделей фильтрации для предварительной обработки изображений реакции ДДИТ.

2. Разработать новые модели обработки показаний ДДИТ, адаптированные к особенностям исследуемых изображений, которые обеспечат построение эффективного формального описания и позволят осуществить калибровку ДДИТ по относительной площади «темных пятен».

3. Разработать новую модель автоматической сегментации информативных объектов изображений реакции ДДИТ, исследовать ее эффективность и точность.

4. Разработать новые способы линейаризации бинарных изображений реакции ДДИТ (скелетизация, выделение контура).

5. Установить зависимость между изменением вида напряженного состояния образцов и ориентацией скелетных линий изображений реакции ДДИТ. Разработать методику идентификации условий циклического нагружения на основе анализа скелетизированных изображений.

6. Разработать новые математические модели восстановления одно- и двумерных тарировочных зависимостей с применением строгих математических критериев оптимальности.

7. Разработать специализированное программное обеспечение, объединяющее все предложенные модели и обеспечивающее алгоритмизацию и автоматизацию решения задач структурного и ситуационного анализа показаний ДДИТ.

**Объект и предмет исследования.** Исследования выполнены в области цифровой обработки и анализа изображений. Предметом исследования являются объекты на полутоновых изображениях реакции ДДИТ в виде «темных пятен», которые являются следствием необратимых смещений атомов кристаллической решетки в результате накопления пластических деформаций в материале ДДИТ при циклическом нагружении.

**Методы исследований.** В качестве теоретических методов исследования использовались методы цифровой обработки изображений, теории вероятности, математической статистики, математического анализа и математического моделирования. Для программной реализации

разработанных математических моделей и алгоритмов использовались методы создания программных систем, методы оптимизации программных комплексов и программирование на языках высокого уровня (Visual C++).

**Моделирование и основной вычислительный эксперимент** проводились с использованием математических пакетов (Matchcad, MatLab для предварительных исследований и проверки гипотез) и пакета программ, реализованных в среде Visual C++ (основной вычислительный эксперимент).

**Научная новизна** диссертационной работы заключается в следующем:

1. Модель комбинированной фильтрации представляет собой новый перспективный подход к дифференцированному сглаживанию фрагментов изображений реакции ДДИТ. Предложенные способы модификации данной модели базируются на свойствах локальной адаптации комплекса применяемых преобразований к особенностям изображений. Задачи построения моделей фильтрации, связанные с получением качественных формальных описаний изображений реакции ДДИТ, как объектов анализа, решаются при помощи изучения структуры и содержания изображений.

2. Модель сегментации, разработанная на основе маркировки связных объектов («темных пятен»), представляет собой иерархическую кластер-процедуру и обеспечивает автоматическое разделение малоcontrastных объектов, расположенных на сложном фоне изображений реакции ДДИТ. Эта модель является основой для реализации последующих процедур структурного и морфологического анализа изображений.

3. Новые модели скелетизации бинарных изображений реакции ДДИТ, позволяют решить проблему сохранения геометрических и топологических характеристик изображений. На основе компьютерного анализа структуры скелетизированного изображения реализована методика идентификации некоторых условий нагружения образцов деталей и конструкций машин в месте наклейки ДДИТ (изгиб, кручение, изгиб с кручением, растяжение).

4. Разработаны новые математические модели восстановления одно- и двумерных тарировочных зависимостей, которые позволяют реализовать

степень оптимального соотношения между точностью аппроксимации эмпирического материала и надежностью полученного результата, равной 0.95, в условиях ограниченного объема данных ( $n \leq 20$ ).

5. Разработан и внедрен программный комплекс ImageAnalyser, который, реализуя построенные модели и алгоритмы, объединяет в себе результаты проведенных теоретических и экспериментальных исследований и позволяет осуществлять научные исследования усталости на основе компьютерной обработки изображений реакции ДДИТ.

**На защиту выносятся следующие научные положения:**

1. Разработанная модель комбинированной фильтрации изображений представляет собой способ эффективной формализации изображений реакции ДДИТ, который дает возможность работать с представлениями, отражающими семантику изображения, т.е. информацию, заключенную в его внутренней структуре и структуре внешних связей с изменениями, происходящими в материале исследуемой детали. Использование данной модели позволяет получить количественные оценки измененного состояния поверхности ДДИТ и осуществить калибровку датчиков по величине относительной площади “темных пятен”.

2. Новая модель маркировки бинарных изображений реакции ДДИТ позволяет решить проблему автоматического обнаружения и сегментации малококонтрастных объектов на сложном фоне изображений. При помощи данной модели можно выделить различные объекты изображений, выявить пространственные связи между ними, оценить их количество и размеры.

3. Разработанные модели линеаризации изображений (выделение контура, скелетизирования) не нарушают условия связности (непрерывности) объектов и сохраняют их топологию. Компьютерный анализ топологической структуры скелетизированных изображений реакции ДДИТ позволяет определить ориентацию “темных пятен” на поверхности датчика, идентифицировать условия нагружения, что дает возможность получать

качественную информацию о характере усталостных повреждений в процессе испытаний объектов на выносливость.

4. Математические модели восстановления одно- и двумерных тарировочных зависимостей позволяют решить целый комплекс нетривиальных проблем интерпретации экспериментальных данных, одна из важнейших задач которого состоит в определении функциональных связей между характеристиками процесса нагружения и фиксируемыми результатами наблюдений по заданному критерию оценки реакции ДДИТ. Использование этих моделей позволяет с надежностью 0,95 добиться оптимальной степени близости аппроксимирующей функции к экспериментальным значениям.

#### **Практическая ценность диссертации.**

1. Разработанные математические модели и алгоритмы дают возможность существенно повысить информационность и достоверность методов диагностики усталости деталей и конструкций машин на основе компьютерной обработки показаний ДДИТ, обеспечить однозначность идентификации выявленных параметров, способствуют повышению эффективности работы исследователя и получению более качественных и точных результатов. Простота и вычислительная эффективность предложенных методов обеспечивают обработку экспериментальных данных в режиме реального времени.

2. Модули пакета программ, разработанного автором на языке Visual C++ и оптимизированного по критерию минимума показателя вычислительной сложности, легко интегрируются в другие цифровые системы анализа и обработки изображений для решения практических задач оценки остаточной работоспособности деталей и конструкций машин по критерию усталостного повреждения на основе показаний ДДИТ.

**Реализация результатов исследования.** Программный комплекс ImageAnalyser, включающий в себя разработанные математические модели, используется для обработки показаний ДДИТ и оценки усталостного

повреждения элементов ходовой части легковых автомобилей марки ВАЗ-2110, ВАЗ-2111, ВАЗ-2112, проходящих регулярное техническое обслуживание и ремонт в «Автоцентре на Омской» (ЗАО «Апрель», г. Курган), что подтверждается соответствующим актом о внедрении.

**Личный вклад соискателя.** Все предлагаемые математические модели и алгоритмы были разработаны и программно реализованы лично автором. Научный руководитель принимал участие в постановке задач, определении возможных путей решения и их предварительном анализе

**Апробация работы.** Основные результаты и положения работы обсуждались на следующих конференциях: международная научно-техническая конференция «Проблемы развития ТЭК Западной Сибири на современном этапе», посвященная 40-летию Тюменского государственного нефтегазового университета (г. Тюмень, ТюмГНГУ, 2003 г.), 2-ая международная научно-техническая конференция «Новые технологии в нефтяной отрасли и образовании» (г. Тюмень, ТюмГНГУ, 2006 г.).

**Публикации.** По теме диссертации опубликовано 12 печатных работ, из них 2 – в центральных журналах, 7 статей в сборниках научных трудов, 3 доклада на международных конференциях.

**Структура и объем диссертации.** Диссертационная работа состоит из введения, четырёх глав, заключения, библиографии и приложений. Материал работы изложен на 149 страницах основного текста, содержит 24 рисунка, 7 таблиц, 1 приложение. Библиография включает 84 наименования.

Автор выражает благодарность доценту кафедры «Технология и автоматизация сварочного производства» Курганского государственного университета, к.т.н. Троценко Д.А. за консультации и помощь в процессе работы над диссертацией.

## **ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ**

Во **введении** обоснована актуальность выполненного исследования. Дана краткая характеристика состояния проблемы, поставлены цель и задачи

исследования, сформулированы научная новизна и практическая значимость работы, аннотируются основные положения, выносимые на защиту.

**В первой главе** диссертационной работы выполнен анализ состояния предметной области. Проведен обзор существующих методов исследования распределения напряжений и деформаций на поверхности деталей и конструкций машин в условиях циклического нагружения (дифференциальный и интегральный). Установлено, что новые методики, основанные на применении ДДИТ, обладают потенциально высокими возможностями. На основе анализа существующих методов оценки регистрации и оценки структурных изменений ДДИТ (по моменту появления первых "темных пятен"; по первым зернам измененной структуры; по измерению микротвердости датчика; с помощью оригинальных оптических средств измерения отражательной способности поверхности датчика; по относительной площади "темных пятен"), сделан вывод о том, что использование возможностей компьютерных технологий для обработки и идентификации цифровых изображений реакции ДДИТ является перспективным направлением исследований в этой области.

Рассмотрены основные задачи и особенности обработки изображений реакции ДДИТ, среди которых можно выделить массовый характер решаемой задачи, наличие количественных критериев точности, сложную модель наблюдения объекта, ограничение на вычислительные ресурсы и на время ответа, необходимость объединения различных математических моделей и алгоритмов в единую систему математического обеспечения.

**Во второй главе** «Разработка новых математических моделей и алгоритмов компьютерной обработки и анализа цифровых изображений реакции датчиков деформаций интегрального типа» рассмотрена проблематика и особенности задач обработки и идентификации показаний датчиков. Показано, что изображения реакции ДДИТ можно отнести к идентифицируемым объектам с плохо определенной структурой (нечетким образом). Удаление шумов на таких изображениях без внесения искажений в

информативные детали и структуры представляет собой одну из главных проблем автоматизации процессов обработки и анализа изображений.

Сравнительный анализ известных моделей фильтрации (фильтр Винера, медианный фильтр и различные его модификации, статистический фильтр, низкочастотный и высокочастотный пространственные фильтры, фильтрация с помощью преобразования Фурье, вейвлет-преобразования и др.), показал, что использование этих моделей обеспечивает формирование слабоконтрастных изображений реакции ДДИТ, приводит к размыванию границ объектов и к стиранию значимых элементов. Кроме того, при тарировании ДДИТ по относительной площади «темных пятен» наблюдается неконтролируемый разброс экспериментальных данных в зависимости от выбранного режима фильтрации.

Разработана модель маркировочного фильтра. Использование в рамках этой модели дифференцированного подхода к сглаживанию различных областей изображений реакции ДДИТ позволяет достичь компромиссного решения известного противоречия между сглаживанием шума и сохранением контрастных структур различной ориентации.

Модель сегментации объектов изображений реакции ДДИТ основана на элементах кластерного анализа с применением иерархических методов классификации. Особенность данной модели заключается в сегментации объектов бинарного по принципу их связности и маркировке выделенных максимальных связных компонент, что дает возможность реализовать методики автоматической классификации и распознавания объектов изображений реакции ДДИТ.

Рассмотрены способы выделения контуров изображений (методы высокочастотной фильтрации, пространственного дифференцирования, функциональной аппроксимации, прослеживания границ). Показано, что на основе этих моделей контуры объектов изображений реакции ДДИТ получаются незамкнутыми либо утолщенными, поэтому необходимость сохранения связности автоматически порождает проблемы, относящиеся к

топологии и связанные с порождением ложных линий. Разработанная модель выделения контура осуществляется на основе эффективного подбора весовых множителей специального оператора  $K$ . Выходной эффект данного преобразования определяется линейной комбинацией входных данных:

$$F(i, j) = \sum_{i_1} \sum_{j_1} K(i_1, j_1) \cdot f_{i-i_1, j-j_1} / G^2.$$

Здесь  $F = \{f_{ij}\}$ ,  $i = \overline{1, m}$ ,  $j = \overline{1, n}$ , - дискретная матрица изображения,  $i_1, j_1 \in S$ ,  $S$  - апертура фильтра,  $K(i_1, j_1)$  - весовые коэффициенты, совокупность которых представляет собой двумерную импульсную характеристику оператора  $K$ ,  $G$  - сумма весовых коэффициентов.

Модель скелетизации изображения реакции ДДИТ основана на метрическом определении скелета: точка  $P$  является скелетной точкой множества  $R$ , если  $d(P, B) = d(P, M_1) = d(P, M_2)$ , где  $M_1, M_2$  - точки, лежащие на границе  $B$  данного множества  $R$ , причем  $d(P, B) = \inf\{d(P, Y), Y \in B\}$ .

Компьютерная реализация разработанной модели заключается в постепенном удалении одного слоя граничных пикселей каждой промаркированной связной компоненты изображения:

$$\Phi_6 = f \oplus \phi_6, \Phi_5 = f \oplus \phi_5, \Phi_4 = f \oplus \phi_4, \Phi_3 = f \oplus \phi_3.$$

Здесь  $\oplus$  - операция сложения по модулю 2,  $f$  -  $i$ -ая строка изображения,  $\phi_6 = \alpha_6 \wedge \beta_6 = \bar{3} \wedge 7 \wedge f_{ij} (\bar{2} \wedge 5 \vee \bar{4} \wedge 1 \vee 1 \wedge 5)$ ,  $\phi_5 = \alpha_5 \wedge \beta_5 = \bar{5} \wedge 1 \wedge f_{ij} (\bar{4} \wedge 7 \vee \bar{6} \wedge 3 \vee 3 \wedge 7)$ ,  $\phi_4 = \alpha_4 \wedge \beta_4 = \bar{7} \wedge 3 \wedge f_{ij} (\bar{6} \wedge 1 \vee \bar{8} \wedge 5 \vee 5 \wedge 1)$ ,  $\phi_3 = \alpha_3 \wedge \beta_3 = \bar{1} \wedge 5 \wedge f_{ij} (\bar{8} \wedge 2 \vee \bar{2} \wedge 6 \vee 6 \wedge 3)$  - булевы функции, определяющие крайние верхние, левые, нижние и правые

$$\begin{pmatrix} 4 & 3 & 2 \\ 5 & f_{i,j} & 1 \\ 6 & 7 & 8 \end{pmatrix}$$

Рис. 1. Нумерация 8-связных пикселей

пиксели каждого промаркированного объекта изображения соответственно. Для удобства математического описания процедуры элементы 8-связной окрестности рабочего пикселя  $f_{ij}$  обозначим в соответствии с рис. 1.

Разработаны модели восстановления одно- и двумерных тарировочных зависимостей, которые определяют функциональную связь между характеристиками процесса нагружения

(амплитуда, число циклов деформирования) и фиксируемыми результатами наблюдений (относительная площадь «темных пятен»). Модели основаны на теории минимизации функционала эмпирического риска:

$$I_{\ominus}(\alpha) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (y_i - F(x_i, \alpha))^2,$$

который соответствует минимуму среднеквадратической ошибки построения приближающей функции. Для зависимостей  $\delta = \delta(N)$  функционал  $I_{\ominus}(\delta)$  имеет вид:

$$I_{\ominus}(\delta) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{(\delta_i - \delta(N_i))^2}{\sigma_i^2},$$

где  $(N_i, \delta_i)$ ,  $i = 1, \dots, n$  - независимые пары значений аппроксимируемой функции  $\delta$  (относительная площадь «темных пятен») и ее аргумента  $N$  (число циклов нагружения образца),  $\sigma_i^2$  - дисперсии замеров  $\delta_i$ .

Построение одномерных тарировочных зависимостей реализовано в классе алгебраических полиномов (полиномиальная регрессия):

$$\delta(N) = \sum_{j=0}^k \alpha_j N^j = \alpha_0 + \alpha_1 N + \alpha_2 N^2 + \dots + \alpha_k N^k$$

и в классе полиномов Чебышева

$$\delta(N) = \sum_{j=0}^k \alpha_j Q_j(N), \text{ где } Q_j(N) = \cos(j \cdot \arccos(N)).$$

Для восстановления многомерной тарировочной зависимости используется модифицированный метод всех регрессий. В его основе лежит использование многофакторной модели следующего вида:

$$y = a_0 \cdot f_1(x_1) \cdot f_2(x_2) \dots f_n(x_n),$$

Искомая функция представляет собой произведение одномерных базовых функций  $f_i(x_i)$ , параметры которых рассчитываются на основе разработанной модели построения полиномиальной регрессии.

В **третьей главе** «Компьютерная реализация и результаты тестирования математических моделей и алгоритмов обработки изображений реакции

датчиков деформаций интегрального типа» рассмотрены вопросы программной реализации разработанных математических моделей.

Приведено описание возможностей и интерфейса программного комплекса ImageAnalyser, разработанного для проведения вычислительного эксперимента, для создания которого была использована интегрированная среда разработки программ – Microsoft Visual C++. Программный комплекс содержит меню пользователя, архивы данных, графическое представление получаемых результатов. Используется многодокументный интерфейс, что позволяет вести обработку большого количества изображений в рабочем поле программы. Для ряда процедур осуществляется вызов специальных диалоговых окон – мастеров. Работа мастеров демонстрируется при реализации конкретных процедур обработки изображений.

Для улучшения результатов фильтрации при помощи маркировочного фильтра осуществлена классификация изображений реакции ДДИТ по особенностям представления информативных объектов (размер объектов и неравномерность основного фона) и рассмотрены модификации маркировочного фильтра, разработанные для каждого класса изображений. Модели фильтрации обладают важным свойством локальной адаптации к характеристикам обрабатываемого изображения, что обеспечивает достоверность последующих процедур их идентификации.

Эффективность и точность разработанной модели маркировки находится в непосредственной зависимости от промежуточного значения счетчика неполных компонент, неконтролируемое увеличение которого, влечет за собой большую погрешность, поэтому при обработке пикселей изображения нельзя забывать о коррекции результата по яркостному диапазону (0..255).

Компьютерная реализация моделей линеаризации изображений реакции ДДИТ подтвердила их высокую эффективность. Для реализации модели скелетизации требуется не более  $l_{\max} / 2$  циклов, где  $l_{\max}$  — максимальная толщина линии скелетизированного изображения.

Проведен анализ изображений реакции ДДИТ при различных видах циклического нагружения (изгиб, кручение, изгиб с кручением, растяжение) Разработана модель слежения скелетной линии методика для идентификации данных условий нагружения.

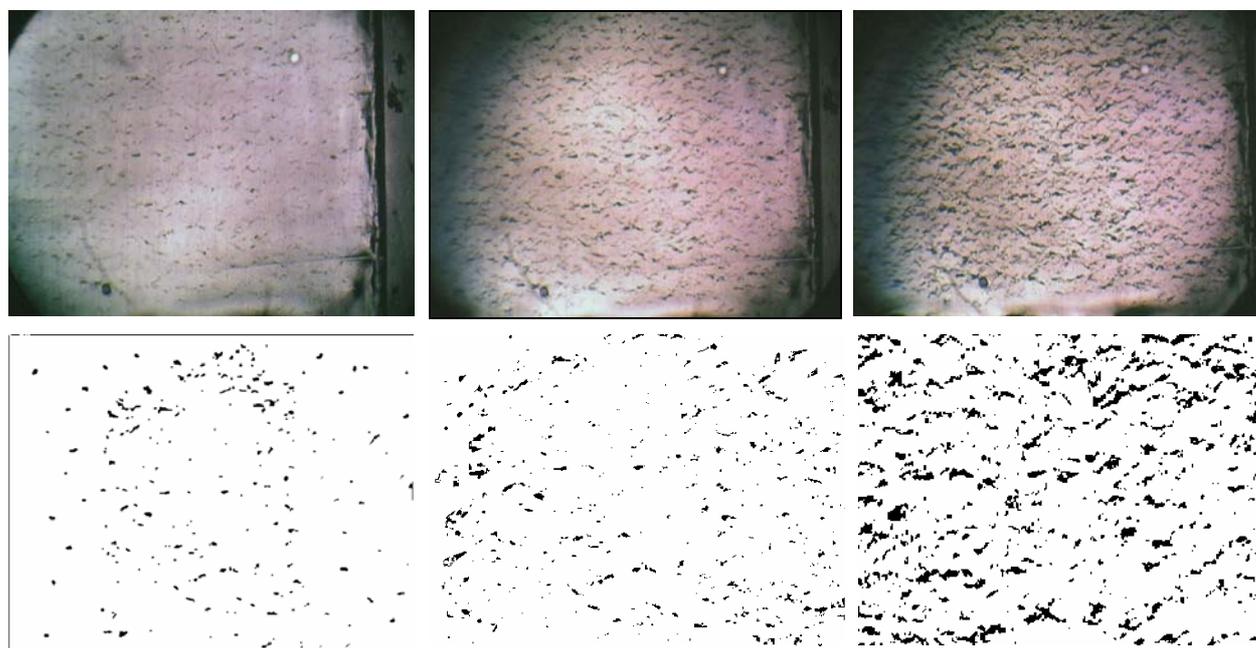
Для компьютерного тестирования математических моделей восстановления одно- и двумерных тарировочных зависимостей использованы задачи построения полиномиального приближения к регрессии, значения которой заданы со случайной помехой. Качество аппроксимации на основе экспериментальной выборки ограниченного объема  $n$  с вероятностью  $1 - \eta = 0.95$  определялось по равномерной оценке величины среднего риска для заданного класса функций емкости  $h$ :

$$I(\alpha) \leq \left[ \frac{I_3(\alpha)}{1 - \sqrt{\frac{h \left( \ln \frac{n}{h} + 1 \right) - \ln \eta}{n}}} \right]_{\infty}, \text{ где } [z] = \begin{cases} z, & z \geq 0, \\ \infty, & z < 0, \end{cases}$$

**В четвертой главе** разработана общая стратегия получения прогнозируемых оценок накопления усталостных повреждений в материале конструкций магистральных трубопроводов при помощи программного комплекса ImageAnalyser. Рассмотренная расчетно-экспериментальная методика обработки изображений реакции ДДИТ была использована для исследования прочностных свойств образцов конструкции магистрального трубопровода (диаметр 720 мм, толщина стенки 9 мм, материал трубы – сталь 14 ХГС). Испытания осуществлялись на машине усталостных испытаний МУИ-6000 в условиях циклического растяжения до наработки соответствующего числа циклов ( $N = 86000$ ) или до поломки образцов. Используемые в эксперименте ДДИТ были изготовлены из алюминиевой фольги в виде прямоугольной полоски размером 4×60 мм.

Выполнена калибровка ДДИТ, деформируемых при изменении длительности нагружения образцов, по относительной площади «темных

пятен» (рис. 2). Эти данные фиксируют не только момент появления реакции в виде первых “темных пятен”, но и динамику их распространения по поверхности ДДИТ.



а)  $N = 30 \cdot 10^3$ ,  $\delta = 1.4045$     б)  $N = 50 \cdot 10^3$ ,  $\delta = 3.6250$     в)  $N = 81 \cdot 10^3$ ,  $\delta = 12.9071$

Рис. 2. Обработка изображений реакции ДДИТ

Структурный анализ скелетных линий изображений реакции ДДИТ, полученных в условиях циклического растяжения образца, подтверждает гипотезу о том, что эти линии располагаются вдоль оси образца. Для построения основных расчетных зависимостей метода прогнозирования восстановлена тарировочная зависимость (рис. 3), которая обеспечивает необходимое качество аппроксимации с вероятностью 0,95 при  $\sigma = 265.06$  МПа и  $0 \leq N \leq 81000$ :

$$\delta = 0.3701 + 0.0662 \cdot x + 0.9116 \cdot x^2 + 6.1916 \cdot x^3 + 5.0771 \cdot x^4, \text{ где } x = \lg N.$$

Коэффициент корреляции экспериментальных данных равен 0.9907. Построены зависимости при усталостных испытаниях идентичных образцов трубы для значений напряжения  $\sigma = 235.2$  МПа и  $\sigma = 280$  МПа.

Проведен дисперсионный анализ результатов тарирования ДДИТ. Определена величина остаточного рассеивания:  $Q_{ост} = \sum_{i=1}^n (\delta_i - \delta(x_i))^2 = 4.3654$  и

остаточная дисперсия линии регрессии:  $s_{ocm}^2 = \frac{Q_{ocm}}{n-2} = \frac{4,3654}{18} \approx 0,2425$ , которые подтвердили, что построенные математические модели хорошо согласуются с экспериментальными данными.

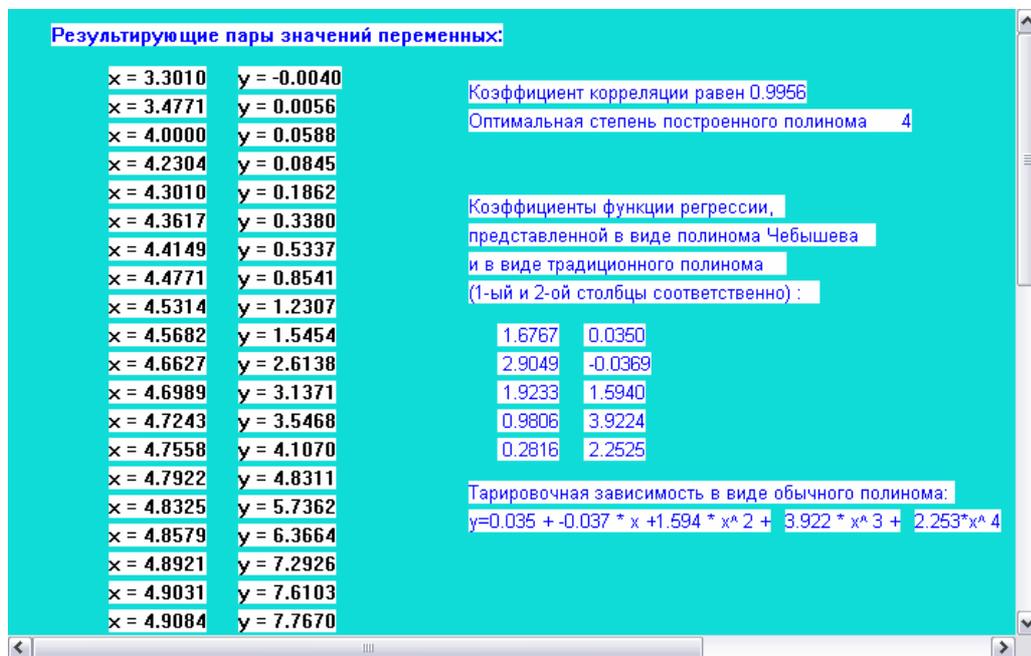


Рис. 3. Коэффициенты тарифовочной зависимости

Для каждого значения доверительной вероятности  $p = 0,95$  и  $p = 0,99$  определены границы доверительных интервалов:

$$\delta^{\pm} = \delta(x_i) \pm \frac{t_{n,p}}{\sqrt{n}} s_{ocm} = \delta(x_i) \pm 0.2313, \delta^{\pm} = \delta(x_i) \pm \frac{t_{n,p}}{\sqrt{n}} s_{ocm} = \delta(x_i) \pm 0.2313$$

Здесь  $t_{n,p}$  - статистика, имеющая  $t$ -распределение Стьюдента с  $k = n - 2$  степенями свободы;  $\delta^-$ ,  $\delta^+$  - нижняя и верхняя граница доверительного интервала соответственно;  $n$ - объем экспериментальной выборки.

Определена доля объясненной вариации

$$R^2 = \frac{S_2^2}{S_1^2} \cdot 100\% = \frac{387.6193}{393.6195} \approx 98.48\%,$$

где  $S_1^2 = Q = \sum_{i=1}^n (\delta_i - \bar{\delta})^2$  - сумма квадратов отклонений, обусловленная общим разбросом параметра  $\delta$  относительно его среднего значения;

$$S_2^2 = \sum_{i=1}^n (\delta(x_i) - \bar{\delta})^2 \quad - \quad \text{сумма квадратов отклонений, обусловленная}$$

направленным трендом.

Установлена значимость влияния двух одновременно действующих факторов  $(N_i, \sigma_i)$  на величину усталостного деформирования образцов  $\delta$ .

Восстановлена двумерная тарировочная зависимость  $\delta = \delta(N, \sigma)$  при  $0 \leq N \leq 80000$ ,  $235.2 \leq \sigma \leq 282.0$  (МПа). Коэффициент множественной корреляции составил 0.9973.

Комплекс разработанных математических моделей адекватно интерпретирует экспериментальные данные, полученные при помощи ДДИТ. С его помощью реализована методика прогнозирования величины напряжений, накопленного усталостного повреждения и числа циклов нагружения образцов конструкции магистрального трубопровода (при наработке до 86000 тыс. циклов) на заданном диапазоне тарирования ДДИТ.

## **ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ДИССЕРТАЦИОННОЙ РАБОТЫ**

1. Осуществлена классификация изображений реакции ДДИТ и разработаны дифференцированные модели фильтрации, адаптированные к особенностям каждого класса изображений. Эти модели обеспечивают генерализацию изображений реакции ДДИТ и калибровку ДДИТ по величине накопленного усталостного повреждения в локальных зонах металлоконструкций в виде относительной площади "темных пятен".

2. Разработана модель маркировки «темных пятен» бинарных изображений реакции ДДИТ. Промаркированное изображение является основой для подсчета ряда морфологических параметров (площадь, периметр, длина, ширина, координаты центра масс, моменты инерции) для формирования признакового пространства исследуемых объектов.

3. Модели линеаризации изображений реакции ДДИТ выделяют непрерывные контуры и скелеты информативных объектов, не нарушая их

топологии. Разработанная модель анализа топологической структуры скелетизированных изображений реакции ДДИТ определяет ориентацию "темных пятен" на поверхности ДДИТ и идентифицирует некоторые условия циклического деформирования образцов (изгиб, кручение, изгиб с кручением, растяжение).

4. Разработаны модели восстановления оптимальных тарировочных зависимостей в условиях малого объема экспериментальных данных ( $n \leq 20$ ) с заданной надежностью 0,95. Аналитическое выражение зависимостей, связывающих микроструктуру материала с его физическими и механическими свойствами, представляет собой простой метод прогнозирования работоспособности деталей и конструкций машин. Этот метод базируется на традиционном подходе - сопоставлении результатов тарирования ДДИТ и данных усталостных испытаний деталей с ДДИТ при одной и той же реакции датчика. Число циклов нагружения образцов до реакции ДДИТ составляет до 10 тыс. циклов, а прогнозируемое число циклов до поломки - сотни тысяч – десятки миллионов циклов, поэтому глубина прогноза превышает на два-три порядка интервал наблюдения.

5. Разработан и внедрен программный комплекс ImageAnalyser, который, реализуя разработанные математические модели, объединяет в себе результаты проведенных теоретических и экспериментальных исследований и осуществляет научные исследования усталости на основе обработки цифровых изображений реакции ДДИТ. Реализация построенных математических моделей, представляет собой новую методику расшифровки реакции ДДИТ, обеспечивает алгоритмизацию и автоматизацию решения задач структурного и ситуационного анализа показаний ДДИТ.

4. Эффективность созданных моделей подтверждена серией стендовых экспериментов, проведенных для проверки адекватности разработанных математических моделей на примере образцов нефтегазового трубопроводного оборудования. Результаты испытаний подтверждают, что изложенная методика обработки показаний ДДИТ работоспособна и дает

возможность решать задачи оценки состояния различных металлоконструкций в условиях фактического нагружения с минимальным количеством экспериментов ( $n \leq 20$ ).

5. Разработанные математические модели и алгоритмы могут служить основой для разработки новых процедур использования ДДИТ в практике экспериментальных работ, учитывающих особенности функционирования исследуемых металлоконструкций и возможности получения информации, требуемой для расшифровки и анализа показаний датчиков. Идеология построения математических моделей легко может быть распространена на целый ряд подобных вопросов. В частности, разработанное программное обеспечение может быть использовано при решении вопросов обеспечения надежности сложных диагностических систем и комплексов.

### **СПИСОК РАБОТ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ**

1. Сызранцев В.Н., Змызгова Т.Р., Змызгов С.Е. Одномерная аппроксимация результатов тарирования датчиков деформаций интегрального типа // Проблемы развития ТЭК Западной Сибири на современном этапе: Труды международной научно-технической конференции, посвященной 40-летию Тюменского государственного нефтегазового университета. Т. 2. - Тюмень: ТюмГНГУ, 2003. – С. 105-108.

2. Сызранцев В.Н., Змызгова Т.Р., Змызгов С.Е. Алгоритмы аппроксимации результатов тарирования датчиков деформаций интегрального типа // Проблемы развития ТЭК Западной Сибири на современном этапе: Труды Международной научно-технической конференции, посвященной 40-летию Тюменского государственного нефтегазового университета. Т. 2. - Тюмень: ТюмГНГУ, 2003. – С. 126-129.

3. Сызранцев В.Н., Змызгова Т.Р. Алгоритмы бинарного квантования цифровых изображений реакции датчиков деформаций интегрального типа. Современные методы изучения пластов и скважин при решении задач разработки нефтяных и газовых месторождений: Сборник трудов кафедры

«Разработка и эксплуатация газовых и газоконденсатных месторождений»  
Вып. 1. – Тюмень: ТюмГНГУ, 2004. – С. 214-220.

4. Сызранцев В.Н., Змызгова Т.Р. Структурный анализ цифровых изображений реакции датчиков деформаций интегрального типа // Современные методы изучения пластов и скважин при решении задач разработки нефтяных и газовых месторождений. Сборник трудов кафедры «Разработка и эксплуатация газовых и газоконденсатных месторождений». Вып. 1. – Тюмень: ТюмГНГУ, 2004. – С. 221-227.

5. Сызранцев В.Н., Троценко Д.А., Змызгова Т.Р. Предварительная обработка цифровых изображений реакции датчиков деформаций интегрального типа для оценки поврежденности сварных соединений. // Современные методы изучения пластов и скважин при решении задач разработки нефтяных и газовых месторождений: Сборник трудов кафедры «Разработка и эксплуатация газовых и газоконденсатных месторождений». Вып. 1. - Тюмень: ТюмГНГУ, 2004. – С. 228-233.

6. Змызгова Т.Р. Алгоритм сегментации цифровых бинарных изображений // Аспирант и соискатель. Вып. 2. - М.: Спутник+, 2005. – С. 159-162.

7. Змызгова Т.Р. Методы фильтрации цифровых изображений реакции ДДИТ с целью количественной оценки накопления усталостных повреждений в сварных соединениях // Сборник научных трудов аспирантов и соискателей Курганского государственного университета. Вып. 7. – Курган: Изд-во Курганского гос. ун-та, 2005. – С. 18-19.

8. Змызгова Т.Р. Проблематика и выбор средств экспериментальной оценки накопленных усталостных повреждений в материале магистральных трубопроводов // Сборник научных трудов аспирантов и соискателей Курганского государственного университета. Вып. 8. – Курган: Изд-во Курганского гос. ун-та, 2006. – С. 21-22.

9. Змызгова Т.Р. Исследование процесса накопления пластических деформаций в датчиках деформаций интегрального типа // Естественные и технические науки. Вып. 2.- М.: Спутник +, 2006. – С. 110-112.

10. Сызранцев В.Н., Змызгова Т.Р., Невелев Я.П. Компьютерная обработка показаний датчиков деформаций интегрального типа // Новые технологии в нефтяной отрасли и образовании: Сборник материалов 2-й международной научно-технической конференции. - Тюмень: ТюмГНГУ, 2006. – С. 73-76.

11. Сызранцев В.Н., Голофаст С.Л., Змызгова Т.Р. Обработка данных тарирования датчиков деформаций интегрального типа по критерию изменения их микротвердости // Известия вузов. Машиностроение. - 2006. - № 12. - С. 12-15.

12. Сызранцев В.Н., Голофаст С.Л., Обакшин П.А., Змызгова Т.Р. Восстановление многомерных функциональных зависимостей по выборкам ограниченного объема // Вестник машиностроения.- 2007. - № 8. - С. 30-32.