

На правах рукописи

БЕЛЯКОВ Андрей Александрович

**ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ЧИСЛА ПОВРЕЖДЕНИЙ  
НА ТРУБОПРОВОДАХ И ДИНАМИКИ РОСТА ТРЕЩИН  
НА НЕОБОГРЕВАЕМЫХ ЭЛЕМЕНТАХ  
ПАРОВЫХ КОТЛОВ ТЭС**

Специальность: 05.14.14 – Тепловые электрические станции, их энергетические системы и агрегаты

**А В Т О Р Е Ф Е Р А Т**  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Иваново  
2010

Работа выполнена на кафедре «Атомные электрические станции» Государственного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И.Ленина»

**Научный руководитель:**

доктор технических наук, профессор

**Семенов Владимир Константинович**

**Официальные оппоненты:**

доктор технических наук, профессор

**Горбатов Валерий Павлович**

доктор технических наук, профессор

**Шувалов Сергей Ильич**

**Ведущее предприятие:**

ОАО «Инженерный центр энергетики Урала» филиал «УралВТИ-Челябэнергосетьпроект» г. Челябинск

Защита диссертации состоится 26.11. 2010 г. в 11-00 на заседании диссертационного совета Д 212.064.01 при Ивановском государственном энергетическом университете по адресу: г. Иваново, ул. Рабфаковская, 34, корп. Б, ауд. № 237.

Отзывы (в двух экземплярах, заверенные печатью организации) просим направлять по адресу: 153003, г. Иваново, ул. Рабфаковская, 34, Ученый совет ИГЭУ. Тел.: (4932) 38-57-12, факс (4932) 38-57-01. E-mail: uch\_sovet@ispu.ru

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке университета. Автореферат диссертации размещен на сайте ИГЭУ [www.ispu.ru](http://www.ispu.ru)

Автореферат разослан «\_\_\_» \_\_\_\_\_ 2010 г.

Ученый секретарь

диссертационного совета Д 212.064.01

доктор технических наук, профессор

**Мошкарин А.В.**

## **ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ**

**Актуальность работы.** Одной из важных задач современной энергетики является повышение эффективности работы существующих энергоблоков, продление их сроков службы, а также сооружение новых блоков. Ситуация в энергетике такова, что большинство работающих блоков уже исчерпали свой ресурс, причем на многих из них оборудование работает без замены с момента первого пуска. Неисправности в работе тепломеханического оборудования и обладающих большой протяженностью трубопроводов электрических станций приводят к вынужденным простоям энергоблоков, дополнительным материальным и трудовым затратам, что является причиной снижения экономичности блока в целом.

Старение и износ трубопроводов и необогреваемых элементов котлов ТЭС обусловлены фазовым и коррозионным составом среды, капле-ударным и коррозионно-эрозионным износом, накоплением шлама на участках с малыми скоростями потока пара, генерацией и поглощением электролитического водорода металлом паропровода и процессами электрохимической коррозии под напряжением.

Многое оборудование снабжено датчиками АСУ ТП, с помощью которых производится мониторинг его состояния. На трубопроводах таких датчиков значительно меньше, да и контролируемые параметрами являются чаще всего давление, температура и концентрация примесей в воде. Эти данные не могут адекватно отражать состояние трубопроводов.

Для отслеживания процессов износа и старения оборудования необходимо создание дополнительной системы, задачей которой являлся бы сбор данных об истории работы конкретного оборудования и прогнозирование его последующих состояний с тем, чтобы на основе данного прогноза можно было бы принять решение о необходимости и объеме предстоящего ремонта. Такой подход позволит вовремя предпринимать необходимые меры по ремонту и поддержанию состояния оборудования на должном уровне.

Так как старение и износ указанных выше элементов тепломеханического оборудования ТЭС обусловлены одними и теми же физико-химическими процессами, то разработка математических моделей и организация индивидуального прогноза количества повреждений трубопроводов и роста трещин в необогреваемых элементах паровых котлов являются чрезвычайно актуальными.

### **Обоснование соответствия паспорту специальности.**

#### *Соответствие диссертации формуле специальности*

В соответствии с формулой специальности 05.14.14 – «Тепловые электрические станции, их энергетические системы и агрегаты» в рамках которой решаются проблемы обеспечения надежности, безопасности и требуемого рабочего ресурса оборудования тепловой электростанции, ее систем и станции в целом, в диссертационном исследовании разработаны математические модели и методы их реализации для прогнозирования числа повреждений на трубопроводах, а также динамики роста трещин на необогреваемых элементах паровых котлов ТЭС.

#### *Соответствие диссертации области исследования специальности*

Отраженные в диссертации научные положения соответствуют области исследования специальности 05.14.14 – «Тепловые электрические станции, их энергетические системы и агрегаты»: математическое моделирование процессов роста

трещин и накопления дефектов в трубопроводах, повышение надежности и рабочего ресурса агрегатов, систем и тепловых электростанций в целом.

Пункту 2 «Исследование и математическое моделирование процессов, протекающих в агрегатах, системах и общем цикле тепловых электростанций» соответствует следующий результат диссертации, отраженный в поставленных задачах и имеющий научную новизну.

Разработаны детерминистские и стохастические математические модели накопления числа повреждений на трубопроводах и динамики роста трещин в необогреваемых элементах паровых котлов. Эти модели позволяют определить не только средние значения прогнозируемых величин, но и их флуктуации. Модели учитывают уникальные условия эксплуатации конкретного оборудования, что позволяет проводить индивидуальный прогноз состояния.

Пункту 5 «Повышение надежности и рабочего ресурса агрегатов, систем и тепловых электростанций в целом» соответствует следующий результат диссертации, отраженный в поставленных задачах и имеющий научную новизну.

Разработаны электронные паспорта прогноза числа повреждений трубопроводов и динамики роста трещин в необогреваемых элементах паровых котлов ТЭС, позволяющие отследить состояние конкретных единиц оборудования в ходе эксплуатации. Эти паспорта могут использоваться при оценке объемов предстоящих ремонтных работ, а также для принятия решений об их необходимости. Прогноз состояния необогреваемых элементов паровых котлов поможет повысить как надежность отдельных элементов, так и станции в целом.

**Объект исследования** – трубопроводы и необогреваемые элементы паровых котлов ТЭС с водной рабочей средой.

**Предмет исследования** – динамические и стохастические модели роста числа повреждений на элементах трубопроводов и роста трещин в необогреваемых элементах паровых котлов ТЭС.

**Цель работы** - разработка математических моделей и создании электронных паспортов прогноза, позволяющих построить функции прогноза количества повреждений на трубопроводах и динамики роста трещин в необогреваемых элементах паровых котлов ТЭС.

Поставленная цель достигнута путем решения следующих задач:

- разработка детерминистских и стохастических математических моделей прогнозирования числа повреждений на трубопроводах и динамики роста трещин в необогреваемых элементах паровых котлов ТЭС;
- определение параметров идентификации функций прогноза и их верификация на основе результатов индивидуального обследования оборудования в условиях эксплуатации;
- разработка программ электронных паспортов, осуществляющих прогноз состояния оборудования в режиме реального времени.

**Научная новизна** работы заключалась в следующем:

1. Разработаны динамические и стохастические математические модели роста числа повреждений на трубопроводах и динамики роста трещин в необогреваемых элементах паровых котлов ТЭС, отличающиеся тем, что позволяют определить не только среднее число повреждений и размер трещины, но и флуктуации этих величин.

2. На основе предложенных математических моделей, разработан пакет программ и приведены результаты численных экспериментов по прогнозированию с точностью до флуктуаций числа повреждений трубопроводов и динамики роста трещин для конкретных элементов тепломеханического оборудования ТЭС.

3. Разработаны электронные паспорта прогноза числа повреждений трубопроводов и динамики роста трещин в необогреваемых элементах паровых котлов ТЭС, позволяющие отследить состояние конкретных единиц оборудования в ходе эксплуатации.

**Достоверность основных результатов** базируется на использовании основных законов физической кинетики, физической химии и верификации результатов прогноза на основе натурального эксперимента.

**Практическая значимость работы.** В результате выполненной работы разработаны научные основы для прогноза количества повреждений трубопроводов ТЭС, а также прогноза роста трещин в необогреваемых элементах паровых котлов ТЭС. Для действующих ТЭС предложено введение электронного паспорта прогноза состояния каждого прогнозируемого элемента. В течение срока эксплуатации оборудования результаты прогноза состояния элементов оборудования корректируются на основе вновь поступающей о нем информации. Полученные результаты рекомендованы для использования на действующих ТЭС.

**Личный вклад автора** заключается в следующем:

- при непосредственном участии автора разработаны математические модели роста дефектов на трубопроводах и динамического роста трещин, программы электронных паспортов прогноза роста дефектов;
- автором собран и обработан обширный материал по накоплению дефектов в трубопроводах и росту трещин в необогреваемых элементах паровых котлов, выполнены численные эксперименты;
- разработаны электронные паспорта прогноза количества повреждений трубопроводов и динамики роста трещин в необогреваемых элементах паровых котлов.

**На защиту выносятся следующие положения и результаты:**

1. Полуэмпирические динамические модели для скорости накопления дефектов в трубопроводах и роста трещин в необогреваемых элементах паровых котлов ТЭС на детерминированном уровне описания.

2. Математические модели стохастического процесса накопления дефектов на поверхности трубопроводов и стохастического процесса роста трещин на необогреваемых элементах паровых котлов.

3. Численные эксперименты по построению функций прогноза количества повреждений, величин трещин на необогреваемых элементах паровых котлов и результаты верификации функций прогноза.

4. Программы электронных паспортов прогноза роста дефектов на трубопроводах и роста трещин в необогреваемых элементах паровых котлов ТЭС.

**Апробация результатов работы и публикации.** По результатам исследований опубликовано 12 работ, включая 6 статей. Основные положения диссертации докладывались на следующих конференциях:

1. Международная научно-техническая конференция «Состояние и перспективы развития электротехнологии» (XIV Бенардосовские чтения), Иваново, 2007.

2. IV научно-техническая конференция «Ресурс и диагностика материалов и конструкций», Екатеринбург, 2009.

3. IV региональная научно-практическая конференция «Состояние, перспективы строительства и ввода в эксплуатацию энергоблоков Ростовской АЭС», Волгодонск, 2009.

4. Седьмая межрегиональная научно-техническая конференция студентов и аспирантов «Информационные технологии, энергетика и экономика», Смоленск, 2009.

5. V региональная научно-практическая конференция «Состояние, перспективы строительства и ввода в эксплуатацию энергоблоков Ростовской АЭС. Безопасная эксплуатация энергоблоков АЭС», Волгодонск, 2010.

6. Международная научно-техническая конференция «Состояние и перспективы развития электротехнологии» (XV Бенардосовские чтения), Иваново, 2009.

7. Шестьдесят третья Региональная научно-техническая конференция студентов, аспирантов и магистрантов высших учебных заведений с международным участием, Ярославль, 2010.

**Структура и объем работы.** Работа содержит 137 страниц основного текста, 60 рисунков, 8 таблиц и состоит из введения, 4 глав, заключения и списка литературных источников из 160 наименований.

### **ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ**

**Во введении** обосновывается актуальность темы диссертации, сформулированы цель и задачи работы, ее научная новизна, практическая ценность, а также основные положения, выносимые на защиту.

**В первой главе** выполнен литературный обзор по текущему состоянию трубопроводов и необогреваемых элементов котлов ТЭС с водной рабочей средой. Описаны условия, в которых работает оборудование, причины его повреждения, методы обнаружения дефектов и сформулированы цели и задачи работы. Показано действие различных нагрузок: весовой, вибрационной, неравномерных температурных расширений и электрохимической коррозии под напряжением, которая является основной причиной повреждений материала труб. Рассмотрены методы оценки состояния трубопроводов и продления сроков их эксплуатации.

В работе проведен обзор методов прогнозирования количества повреждений в элементах тепломеханического оборудования на основе среднестатистических показателей. Установлено, что существующие математические модели прогнозирования остаточного ресурса, в частности трубопроводов, можно разделить на две группы.

К первой группе относятся методы, касающиеся среднестатистических показателей каждого типа оборудования. Сюда относятся модели, основанные на анализе зависимости отказов от времени, методы механики линейного суммирования повреждений, методы параметрического прогнозирования, модели "нагрузка - несущая способность", модели на основе механики разрушений, а также различные вероятностные модели. В моделях этого типа исследуются характеристики группы идентичных единиц оборудования, работающих в одинаковых условиях. Названные модели позволяют оценить ресурс некоего среднестатистического объекта, и не пригодны для прогнозирования состояния каждой конкретной единицы оборудования. Такие модели весьма важны на стадии проектирования и на начальной стадии эксплуатации, когда аппаратура далека от исчерпания своего ресурса, однако в современных условиях важным является прогнозирование состояния конкретного

оборудования, работающего в уникальных условиях, а не некоего среднестатистического.

Ко второй группе относятся методы индивидуального прогнозирования. При этом используются как чисто динамические, так и стохастические модели: метод линейной фильтрации, метод нейронных сетей, фильтр Кальмана, авторегрессия с обучением. Решающее значение для всех моделей, определяющих достоверность индивидуального прогнозирования, имеет выбор функции прогноза. Этот выбор может быть сделан непосредственно на основе результатов обследования объекта с использованием различных распределений (экспоненциального распределения, распределения Пуассона, Вейбулла и пр.).

Другой подход основывается на выявлении тенденции, определяющей поведение объекта в течение эксплуатации. По сравнению с предыдущим этот подход является более продуктивным, поскольку базируется не на случайном подборе прогнозирующей функции, хорошо аппроксимирующей процесс старения объекта на данном временном промежутке, а на законе, которому подчиняется поведение объекта в течение всего срока эксплуатации. Идеология этого подхода и была положена в основу данного исследования.

**Вторая глава** содержит обоснование математических моделей для прогнозирования накопления числа повреждений (дефектов) в материале трубопроводов.

Задача прогнозирования ресурса оборудования заключается в определении момента времени, когда число дефектов достигает некоторого критического состояния, превышение которого может привести к катастрофическим последствиям. До наступления вышеуказанного момента времени аппаратура либо должна сниматься с эксплуатации, либо подвергаться капитальному ремонту. Для прогнозирования этого состояния могут использоваться два подхода, детерминистский и стохастический.

Детерминистский подход основывается на динамическом законе, позволяющем прогнозировать рост дефектов точно без учета их флуктуаций. Этот закон определяется комплексом условий, в которых работают трубопроводы. В силу определенной комбинации этих условий закон в каждом конкретном случае может аппроксимироваться различными функциями, сохраняя при этом свои главные черты. Первой существенной чертой этого закона является одно общее свойство роста повреждений - свойство насыщения, когда количество дефектов не может превысить некий физический предел  $N_p$ . Второй существенной чертой этого закона является зависимость скорости роста числа повреждений от возраста системы, обусловленная усталостью и старением материала трубопровода. Учитывая вышесказанное, в работе предложено следующее полуэмпирическое дифференциальное уравнение, выражающее закон роста числа повреждений

$$\frac{dN^*}{dt} = \lambda(t)(1 - N^*)^n, \quad (1)$$

где  $N^*$  – нормированное на  $N_p$  число повреждений,  $\lambda(t) = \lambda_0 + \alpha t + \beta t^2$  - коэффициент пропорциональности, учитывающий интенсивность роста числа повреждений с возрастом системы. Коэффициенты  $\lambda_0$ ,  $\alpha$ ,  $\beta$  и  $n$  – эмпирические постоянные, подлежащие определению на основе статистической обработки результатов обследования объекта.

Выбору зависимости  $\lambda(t)$  можно дать следующее физическое толкование. Вначале эксплуатации для малых времен доминирующую роль будет играть первый член

разложения, т.е. интенсивность повреждения от возраста системы зависеть не будет. С течением времени система стареет, в ней накапливается усталость, и интенсивность  $\lambda$  будет зависеть от возраста системы. В простейшем случае коэффициент  $n$  можно положить равным 1 и уравнение (1) примет вид:

$$\langle N^* \rangle = 1 - (1 - \langle N_0^* \rangle) \exp(-\lambda_0 t - \frac{\alpha t^2}{2} - \frac{\beta t^3}{3}). \quad (2)$$

Переход к стохастическому уровню описания заключается в формулировании дифференциального уравнения не для самой случайной величины, а для вероятности того, что случайная величина может принимать то или иное значение. В работе используется предположение о том, что процесс накопления повреждений является непрерывным во времени и дискретным по числу повреждений  $N$  марковским процессом. Процесс характеризуется величиной  $Q_m(N, t)dt$  – вероятностью приобретения системой за время  $dt$   $m$  дефектов, когда число дефектов фиксировано и равно  $N$ . На величину  $Q_m(N, t)$  можно смотреть как на средний поток  $m$  дефектов. В самом деле, вероятность приобретения за время  $dt$   $2m$  дефектов равна  $[Q_m(N, t)]^2$ . Она представляет величину второго порядка малости и ею можно пренебречь. Тем более можно пренебречь вероятностью приобретения  $3m$  и большего числа дефектов за время  $dt$ . В таком случае, среднее число дефектов, возникающих в системе за время  $dt$  по определению среднего, будет равно

$$0 \cdot [1 - Q_m(N, t)dt] + 1 \cdot Q_m(N, t)dt = Q_m(N, t)dt. \quad (3)$$

Следовательно, средний поток дефектов равен  $Q_m(N, t)$ . Учитывая вышесказанное, в работе получено уравнение для вероятности  $P(N, t+dt; N_0, t_0)$  того, что система, имевшая в момент времени  $N_0$  к моменту  $t$  будет иметь  $N$  дефектов. Если дефекты следуют по одному ( $m=1$ ), то процесс описывается уравнением

$$\frac{\partial P(N, t; N_0, t_0)}{\partial t} = P(N-1, t; N_0, t_0)Q(N-1, t) - P(N, t; N_0, t_0)Q(N, t). \quad (4)$$

Полученное уравнение в теории марковских процессов называется уравнением чистого размножения и представляет собой частный случай уравнения Колмогорова. Заметим, что при  $N=N_0$  правая часть уравнения не должна содержать первого слагаемого.

Для практики не требуется знание распределения вероятностей, а достаточно знать как ведет себя среднее число дефектов и их разброс, т.е. дисперсия распределения. При условии малости дисперсии распределения  $\Delta \ll \langle N \rangle^2$  в работе методом моментов получены уравнения для среднего числа дефектов и дисперсии распределения

$$\frac{d \langle N \rangle}{dt} \cong Q(\langle N \rangle), \quad (5)$$

$$\frac{d\Delta}{dt} = 2Q_1'(\langle N \rangle, t)\Delta + Q_1(\langle N \rangle, t). \quad (6)$$

Здесь штрихом обозначена производная по  $N$ . Если  $Q(\langle N \rangle, t)$  явно не зависит от времени или переменные разделяются, т.е.  $Q(\langle N \rangle, t) = f(t)Q(\langle N \rangle)$ , то вместо  $t$  можно перейти к переменной  $\langle N \rangle$ , поделив (6) на (5)



$$\frac{d\Delta}{d\langle N \rangle} = 2 \frac{d}{d\langle N \rangle} [\ln Q_1(\langle N \rangle)] \cdot \Delta + 1. \quad (7)$$

Именно уравнение (5) определяет рост числа дефектов на детерминированном уровне описания. Следует заметить, что оно становится точным в случае линейной зависимости  $Q(N)$ . Уравнение (7) является линейным и интегрируется в квадратурах:

$$\Delta = \frac{Q^2(\langle N \rangle)}{Q^2(\langle N_0 \rangle)} \left[ \Delta_0 + Q^2(\langle N_0 \rangle) \int_{\langle N_0 \rangle}^{\langle N \rangle} \frac{dN}{Q^2(N)} \right]. \quad (8)$$

С учетом (2) выражения для дисперсии и относительной флуктуации числа повреждений трубопровода могут быть представлены соответственно в виде:

$$\frac{\Delta}{N_p} = \frac{(1 - \langle N^* \rangle)^2}{(1 - \langle N^*_0 \rangle)^2} \left[ \Delta_0 + \frac{(1 - \langle N^*_0 \rangle)(N^* - N^*_0)}{(1 - \langle N^* \rangle)} \right], \quad (9)$$

$$\frac{\sqrt{\Delta}}{\langle N \rangle} = \sqrt{\frac{1 - \langle N^* \rangle}{N_p \langle N^* \rangle}} = \sqrt{\frac{1}{N_p (\exp(g(t)) - 1)}}. \quad (10)$$

Данная теория допускает обобщение, когда дефекты рождаются пачками или группами. В этом случае уравнение для вероятности  $P(N, t; N_0, t_0)$  принимает вид:

$$\frac{\partial P(N, t)}{\partial t} = \sum_{N'} P(N - N', t) Q_{N'}(N - N', t) - P(N, t) \sum_{N'} Q_{N'}(N, t). \quad (11)$$

Здесь для краткости записи аргументы  $N_0$  и  $t_0$  опущены. Далее аналогично предыдущему можно получить уравнение для среднего числа повреждений и выражение для дисперсии распределения

$$\frac{d\langle N \rangle}{dt} = \sum m Q_m(\langle N \rangle, t), \quad (12)$$

$$\Delta = \frac{\left[ \sum_m m Q_m(\langle N \rangle) \right]^2}{\left[ \sum_m m Q_m(\langle N_0 \rangle) \right]^2} \left( \Delta_0 + \left[ \sum_m m Q_m(\langle N_0 \rangle) \right]^2 \int_{\langle N_0 \rangle}^{\langle N \rangle} \frac{\sum_m m^2 Q_m}{\left( \sum_m m Q_m \right)^3} dN \right). \quad (13)$$

**В третьей главе** представлены результаты обследования и прогнозирования числа повреждений на трубопроводах шести блоков Рязанской ГРЭС.

Основным видом повреждений трубопроводов являются несквозные коррозионные трещины глубиной 1-12мм, вызванные электрохимической коррозией под напряжением в сварных швах и околошовной зоне, эрозионный износ металла и связанное с ним уменьшение толщины стенки трубопровода. Как правило, начальная размер дефекта составляет около 3 мм. Поэтому необходимо методами неразрушающего контроля после проведения сварки регистрировать дефекты размером менее 3 мм. Данные обследования трубопроводов приведены в табл. 1.

Таблица 1. Количество повреждений трубопроводов 6 блоков Рязанской ГРЭС

| Год  | Блок №1 | Блок №2 | Блок №3 | Блок №4 | Блок №5 | Блок №6 |
|------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|
| 2000 | 0       | 1       | 3       | 12      | 0       | 21      |
| 2001 | 22      | 44      | 14      | 9       | 11      | 15      |
| 2002 | 6       | 5       | 34      | 4       | 69      | 2       |
| 2003 | 28      | 5       | 5       | 0       | 3       | 36      |
| 2004 |         | 36      | 39      | 17      | 66      | 0       |
| 2005 | 15      | 5       | 2       | 14      | 9       | 11      |
| 2006 | 9       | 23      | 23      |         | 35      | 24      |
| 2007 |         |         | 19      |         |         |         |

Определение коэффициентов  $\lambda_0$ ,  $\alpha$ ,  $\beta$  проведено в среде MathCad на основе программы регрессионного анализа данных протоколов обследования состояния трубопроводов по методу наименьших квадратов. В качестве примеров на рис.1 и 2 приведены функции прогноза числа повреждений трубопроводов второго и третьего блоков Рязанской ГРЭС. Значения относительной флуктуации количества повреждений трубопроводов тех же блоков показаны на рис. 3 и 4.

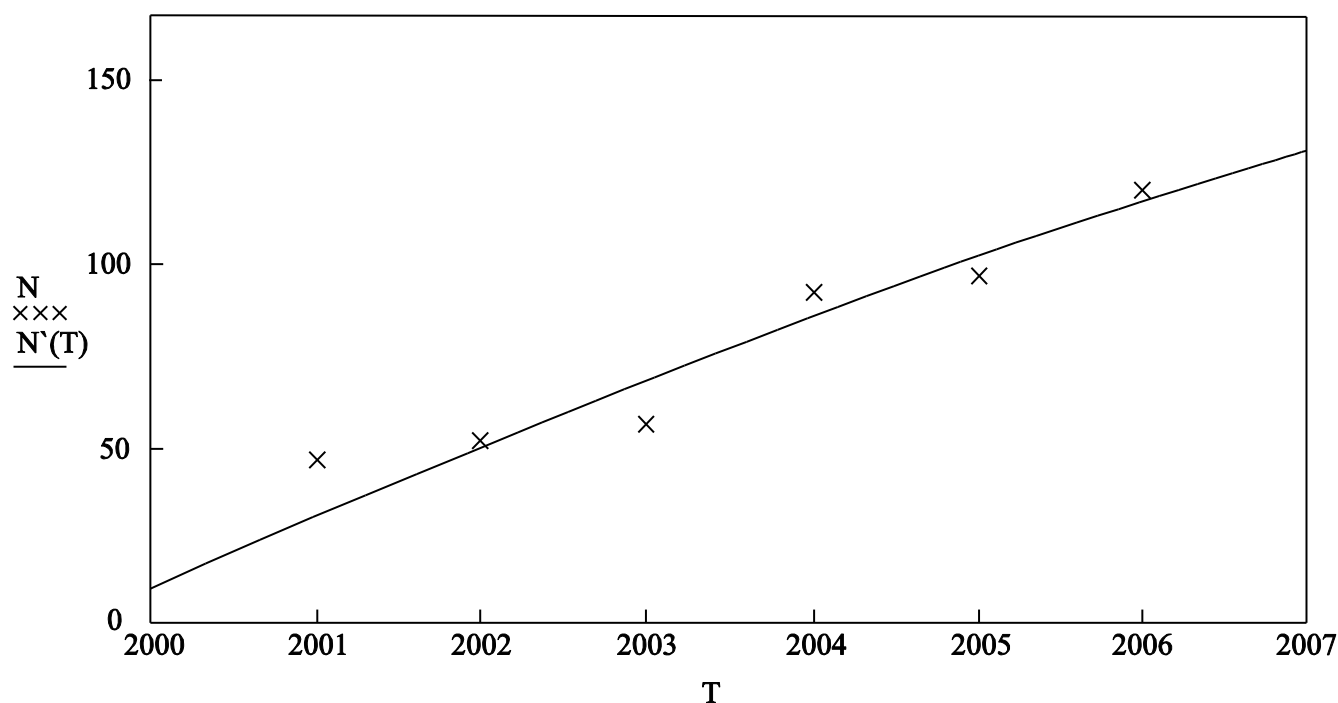


Рис. 1. Функция прогноза числа повреждений трубопровода блока №2 Рязанской ГРЭС

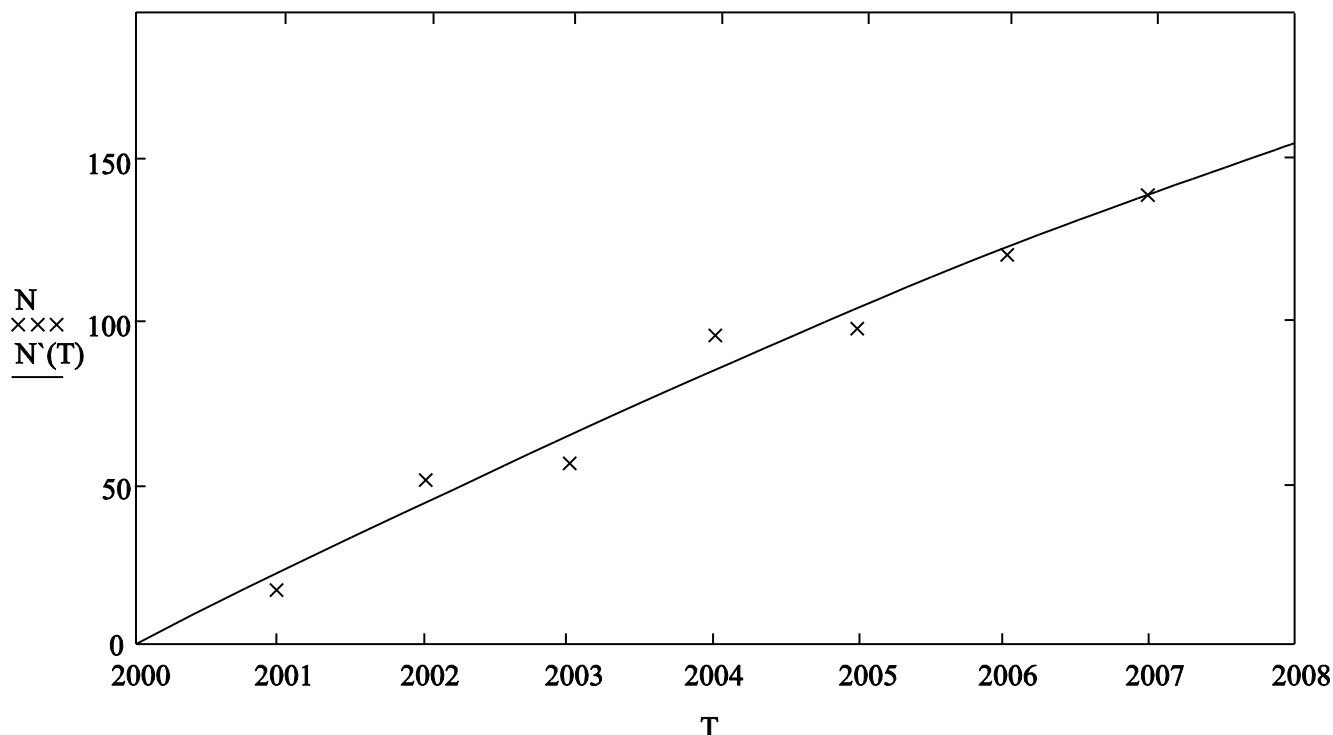


Рис. 2. Функция прогноза числа повреждений трубопровода блока №3 Рязанской ГРЭС

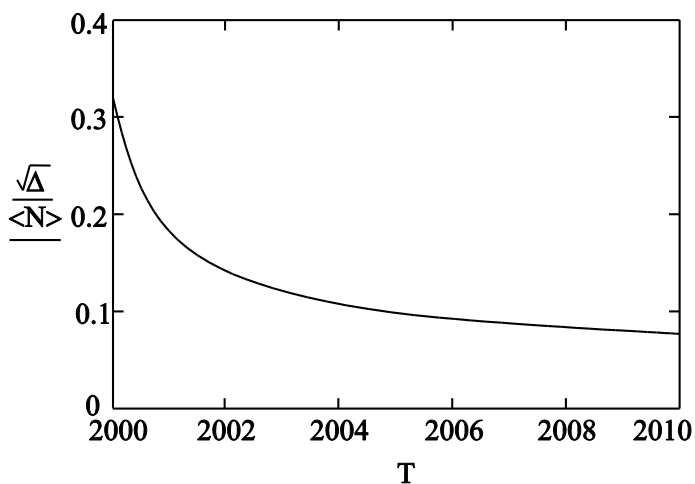


Рис. 3. Зависимость относительной флуктуации числа дефектов от времени трубопровода блока №2

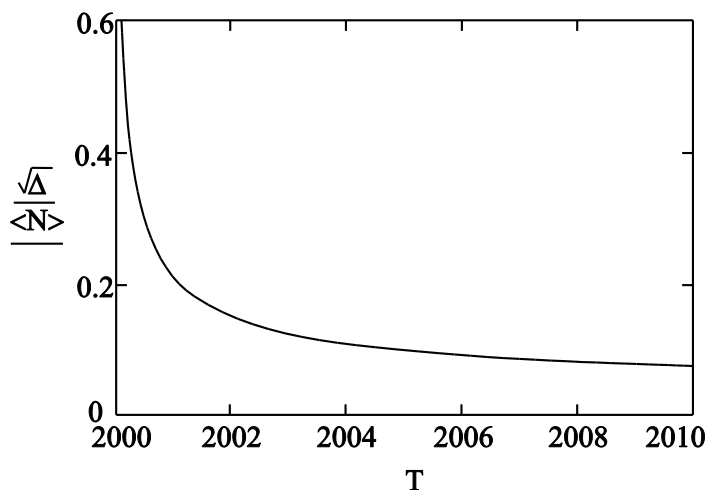


Рис. 4. Зависимость относительной флуктуации числа дефектов от времени трубопровода блока №3

Результаты регрессионного анализа и прогноза количества повреждений на следующий год для 1-6 блоков Рязанской ГРЭС приведены в табл. 2.

Анализ результатов наблюдения, коэффициентов идентификации (табл. 2) и кривых прогноза, говорит о значительном разбросе коэффициентов верификации, а значит о неприемлемости подхода, основанного на прогнозировании дефектов для среднестатистического трубопровода. Прогнозирование должно осуществляться по каждому конкретному трубопроводу индивидуально.

Верифицировать данный прогноз можно путем отбрасывания последней точки известных исходных данных.

Таблица 2. Результаты регрессионного анализа

| Номер блока | $\lambda_0$ ,<br>1/год | $\alpha$ ,<br>1/год <sup>2</sup> | $\beta$ ,<br>1/год <sup>3</sup> | Количество повреждений на<br>последующий год |
|-------------|------------------------|----------------------------------|---------------------------------|--|
| 1           | -116,21                | 0,116                            | $-2,88 \times 10^{-5}$          | 5  |
| 2           | -52,88                 | 0,052                            | $-1,29 \times 10^{-5}$          | 11   |
| 3           | -42,03                 | 0,041                            | $-1,02 \times 10^{-5}$          | 15   |
| 4           | 140,46                 | -0,14                            | $3,51 \times 10^{-5}$           | 15   |
| 5           | -66,38                 | 0,065                            | $-1,61 \times 10^{-5}$          | 30   |
| 6           | 21,50                  | -0,022                           | $5,54 \times 10^{-6}$           | 13   |

На рис. 5 показан график функции прогноза повреждений для блока № 5. Сплошной линией изображена функция прогноза по полным данным, а пунктирной – функция прогноза количества повреждений по данным без учета последней известной точки.

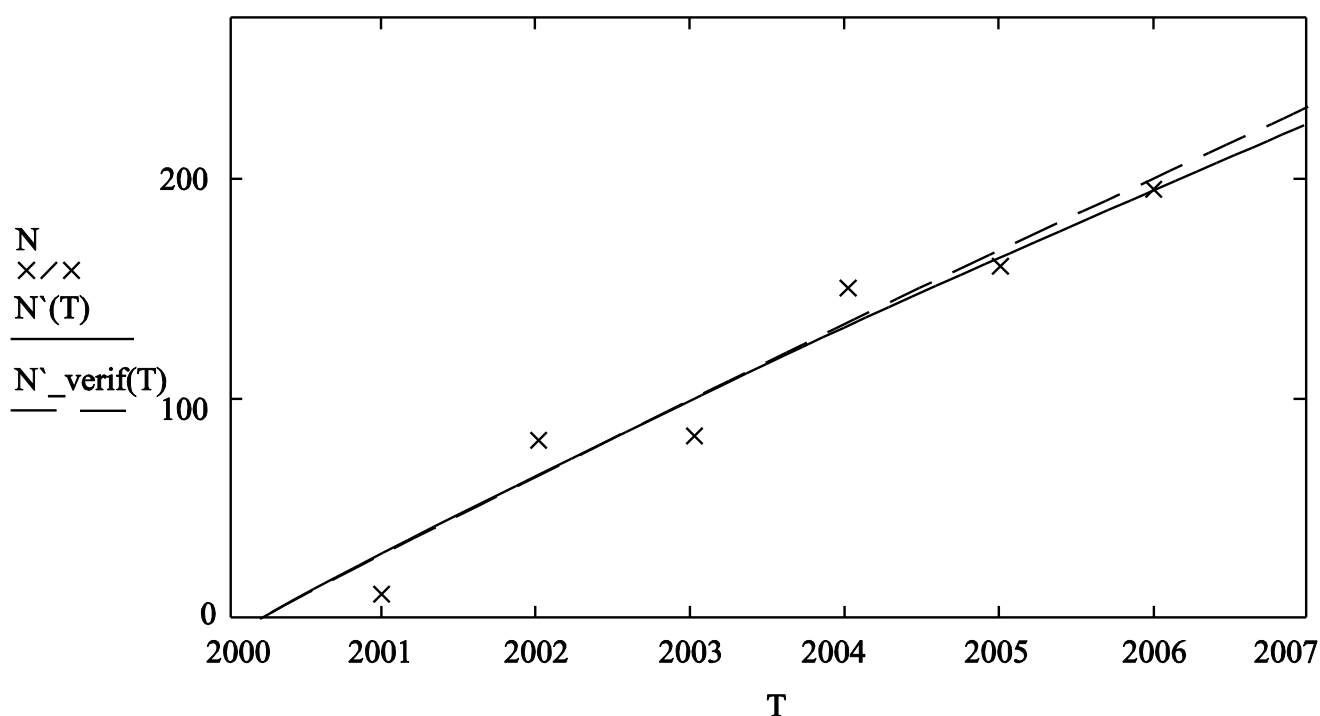


Рис. 5. График функции прогноза количества повреждений трубопровода блока №5 Рязанской ГРЭС

Анализ результатов расчета и кривых, полученных на основе численных экспериментов, показал, что погрешность прогноза для последних экспериментальных точек (прогноз на 1 год) может составлять от нескольких процентов до 10-20 процентов. Поскольку экспериментальные точки часто снимаются ежегодно и наибольший интерес представляет прогноз на короткий промежуток времени, то полученный результат можно признать вполне удовлетворительным. Кроме того, с ростом времени эксплуатации трубопроводов увеличивается число экспериментальных данных, на основе которых определяются коэффициенты идентификации функции прогноза, а стало быть, и точность прогноза.

Для организации обслуживания и ремонта оборудования в зависимости от его технического состояния, в среде Delphi разработана форма электронного паспорта

прогноза состояния трубопроводов. Главное окно программы показано на рис.6. В паспорте отражаются:

- формулы для расчета средних прогнозируемых величин и их флуктуаций;
- таблица данных обследования трубопроводов;
- результаты прогноза в виде кривых и значений коэффициентов идентификации.

Добавление и изменение данных производятся через специальную форму.

**Четвертая глава** содержит обоснование и реализацию математической модели для прогнозирования роста трещин в материале необогреваемых элементах паровых котлов ТЭС с водной средой.

Математическое моделирование роста трещин (полуэмпирические уравнения Пэриса, Эрдогана-Формана и др.) основывается на теории квазиупругого разрушения по концепции Гриффитса. Согласно этой теории рост длины трещины  $l$  в бесконечной среде определяется выражением

$$\frac{dl}{dt} \sim \frac{(K - K_0)^m}{K_c - K}. \quad (14)$$

Здесь  $K = \sigma\sqrt{l}$  - коэффициент интенсивности роста напряжений,  $K_0$  - пороговое значение коэффициента роста напряжений, с которого начинается рост трещины,  $K_c = \sqrt{2E\gamma}$  - критический коэффициент интенсивности напряжений, при котором трещина распространяется со скоростью упругой деформации (по уравнению (14) трещина растет мгновенно),  $\sigma$  - напряжение в материале,  $E$  - модуль Юнга,  $\gamma$  - коэффициент поверхностного натяжения.

На основе проведенного анализа в рамках упомянутой выше теории в работе предложено полуэмпирическое уравнение, описывающее динамику роста трещины в условиях ограниченности ее длины протяженностью области развития трещины  $L$

$$\frac{dl^*}{dt} = \alpha(t)(1 - l^*)^n. \quad (15)$$

Здесь  $l^* = l/L$  - безразмерная длина трещины,  $\alpha(t)$  и  $n$  - эмпирические коэффициенты. С учетом старения материала элемента зависимость  $\alpha(t)$  можно представить в виде отрезка временного ряда

$$\alpha(t) = \alpha_0 + \alpha_1 t + \alpha_2 t^2 + \dots \quad (16)$$

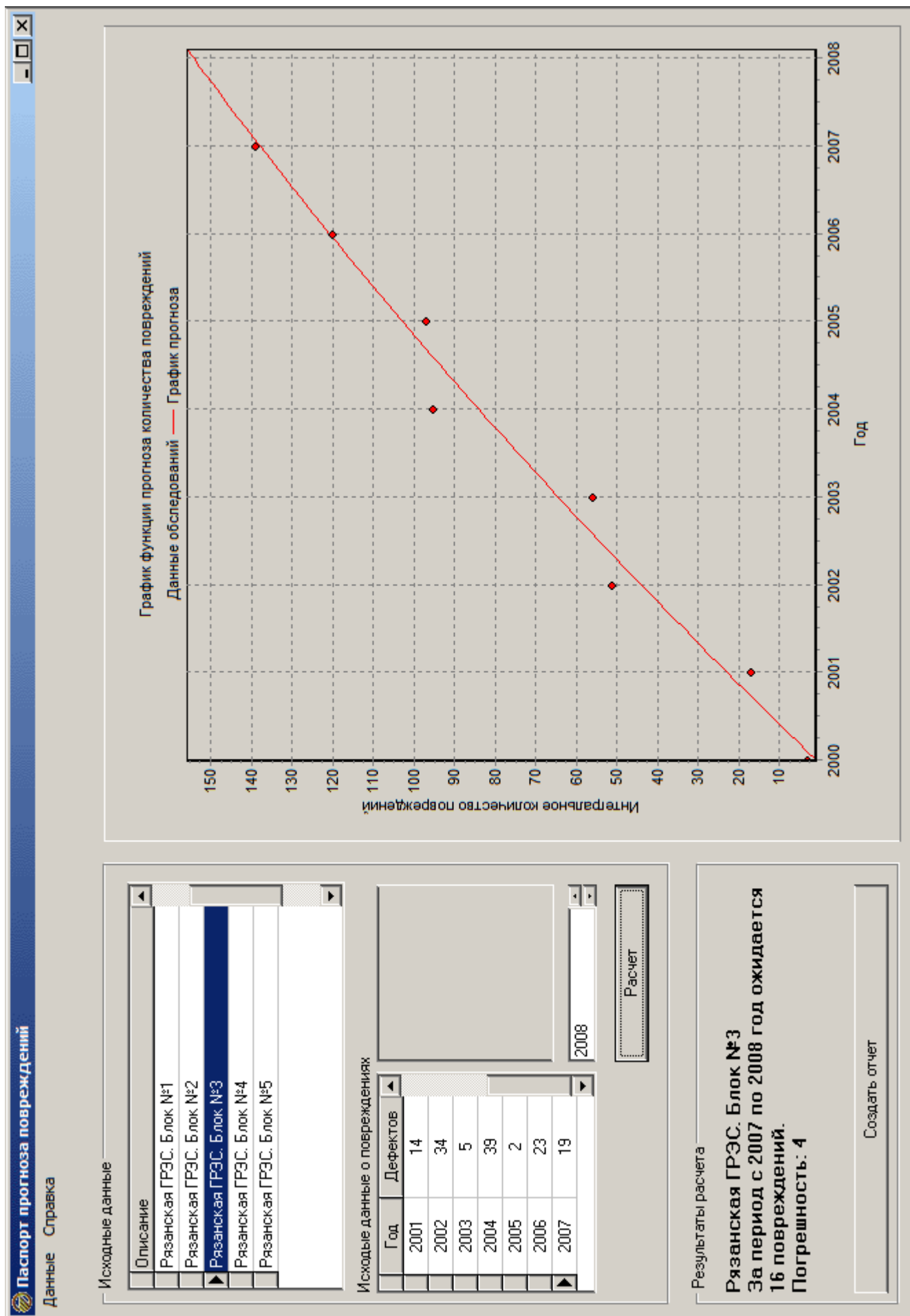
Входящие сюда коэффициенты должны определяться на основе регрессионного анализа результатов натурного эксперимента.

Для  $n=1$  рост средней длины трещины определяется экспоненциальным законом

$$l^*(t) = 1 - \exp(-\lambda(t)). \quad (17)$$

Для  $n>1$  рост трещины происходит по закону

$$l^*(t) = 1 - \frac{1}{[1 + (n-1)\lambda(t)]^{\frac{1}{n-1}}}, \quad \text{где} \quad \lambda(t) = \int_0^t \alpha(t) dt. \quad (18)$$



Статистическое описание роста трещины будем осуществлять заданием функции распределения вероятностей  $\rho(l,t)$ , причем  $\rho(l,t)dl$  – представляет собой вероятность того, что данный участок элемента имеет трещину, длина которой находится в интервале от  $l$  до  $l+dl$ . Процесс характеризуется величиной  $\omega(l,q)dq$  -вероятностью изменения длины трещины за единицу времени от величины  $l$  до  $l+q$ , где  $q$  – длина зоны пластической деформации, возникающей перед вершиной трещины. В работе показано, что уравнение роста трещины является частным случаем уравнения Фоккера-Планка:

$$\frac{\partial \rho(l,t)}{\partial t} = -\frac{\partial}{\partial l}[A(l)\rho(l,t)] + \frac{\partial^2}{\partial l^2}[B(l)\rho(l,t)], \quad (19)$$

$$\text{где } A(l) = \int_0^{\infty} q\omega(l,q)dq, \quad B(l) = \frac{1}{2} \int_0^{\infty} q^2\omega(l,q)dq. \quad (20)$$

Кинетические коэффициенты  $A(l)$  и  $B(l)$  соответственно представляют собой среднее и среднеквадратичное изменение длины трещины за единицу времени.

Как правило, кинетические коэффициенты нелинейно зависят от длины трещины, поэтому решение уравнения Фоккера-Планка можно найти только численными методами при помощи вычислительной техники. Между тем, для практики часто достаточно знать, как ведут себя средние длины трещин и их флуктуации. Для знания этих величин не требуется определения явного вида функции распределения.

В работе, с учетом малой дисперсии распределения  $\Delta = \langle (l - \langle l \rangle)^2 \rangle \ll \langle l^2 \rangle$  методом моментов получены уравнения для средних величин  $\langle l \rangle$  и для дисперсии распределения:

$$\frac{d \langle l \rangle}{dt} \approx A(\langle l \rangle), \quad (21)$$

$$\frac{d\Delta}{dt} = 2 \left( \frac{dA}{dl} \right)_{N=\langle N \rangle} \cdot \Delta + 2B(\langle l \rangle). \quad (22)$$

Если  $A(\langle l \rangle)$  и  $B(\langle l \rangle)$  явно от времени не зависят (или зависят одинаковым образом), то вместо времени  $t$  можно ввести новую переменную  $\langle l \rangle$ . Поделив (22) на (21), получим

$$\frac{d\Delta}{d \langle l \rangle} = \Delta \frac{d}{d \langle l \rangle} \left[ \ln A^2(\langle l \rangle) \right] + 2 \frac{B(\langle l \rangle)}{A(\langle l \rangle)}. \quad (23)$$

Последнее уравнение является линейным и интегрируется в квадратурах

$$\Delta = \frac{A^2(\langle l \rangle)}{A^2(\langle l_0 \rangle)} \left[ \Delta_0 + A^2(l_0) \int_{\langle l_0 \rangle}^{\langle l \rangle} \frac{dl}{A^2(l)} \right]. \quad (24)$$

На детерминированном уровне описания именно уравнение (21) должно лежать в основе всех теорий роста трещин. Заметим, что в случае линейной зависимости  $A(l)$  это уравнение становится точным.

На основе полученных выражений и экспериментальных данных о росте трещин, в среде Mathcad написана программа для расчета коэффициентов идентификации функции прогноза роста трещин и флуктуаций полученных значений.

Верификация функции прогноза осуществляется перерасчетом без учета данных за последний промежуток времени. На рис. 7 показаны зависимости глубины трещины, развивающейся на поверхности отверстий водоопускных труб барабана котла ТГМ-84. Сплошной линией изображен график функции прогноза глубины трещины по полным данным, а пунктирной – график функции прогноза, построенной без учета двух последних точек данных. Значения относительной флуктуации для прогнозируемой глубины трещины изображены на рис. 8.

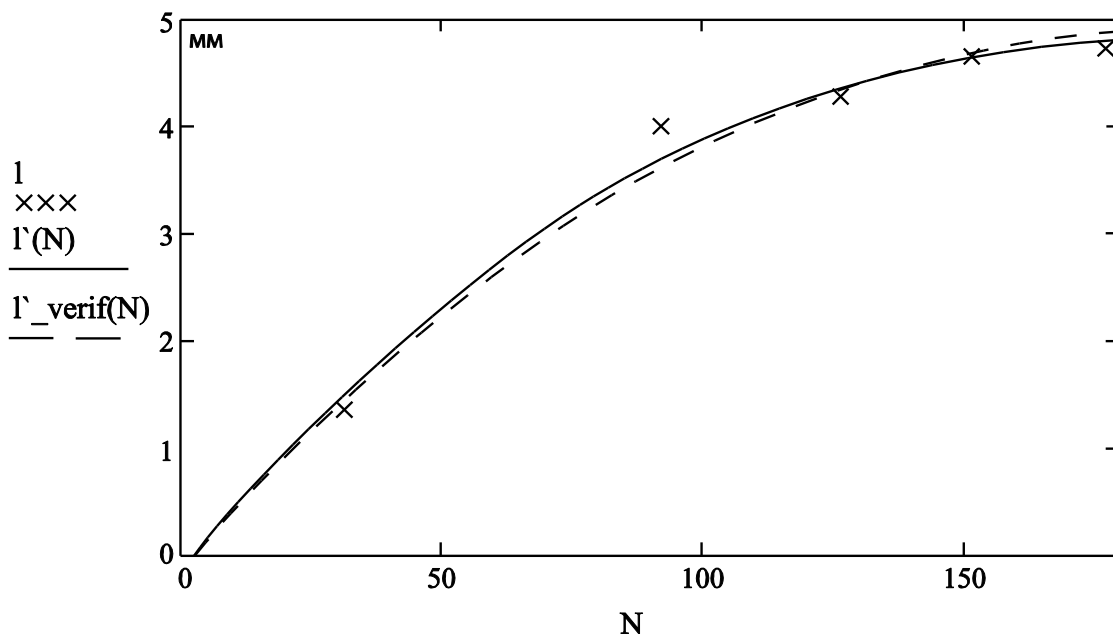


Рис. 7. Функции прогноза роста трещины на поверхности отверстий водоопускных труб барабана котла ТГМ-84

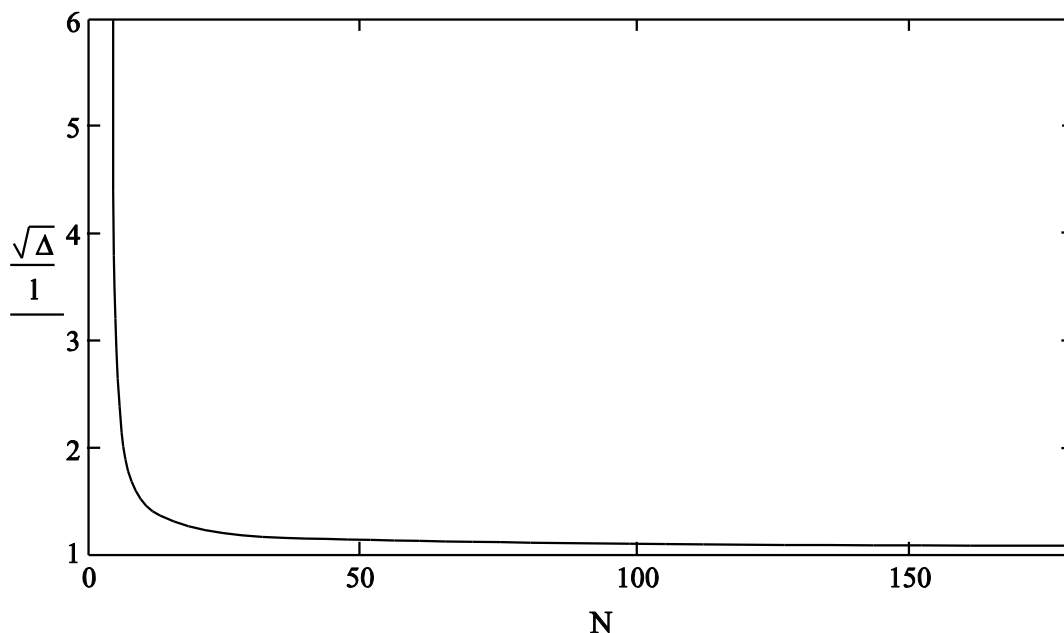


Рис. 8. Относительная флуктуация прогнозируемой глубины трещины на поверхности отверстий водоопускных труб барабана котла ТГМ-84

В табл. 3 показаны результаты расчета прогноза роста трещины.



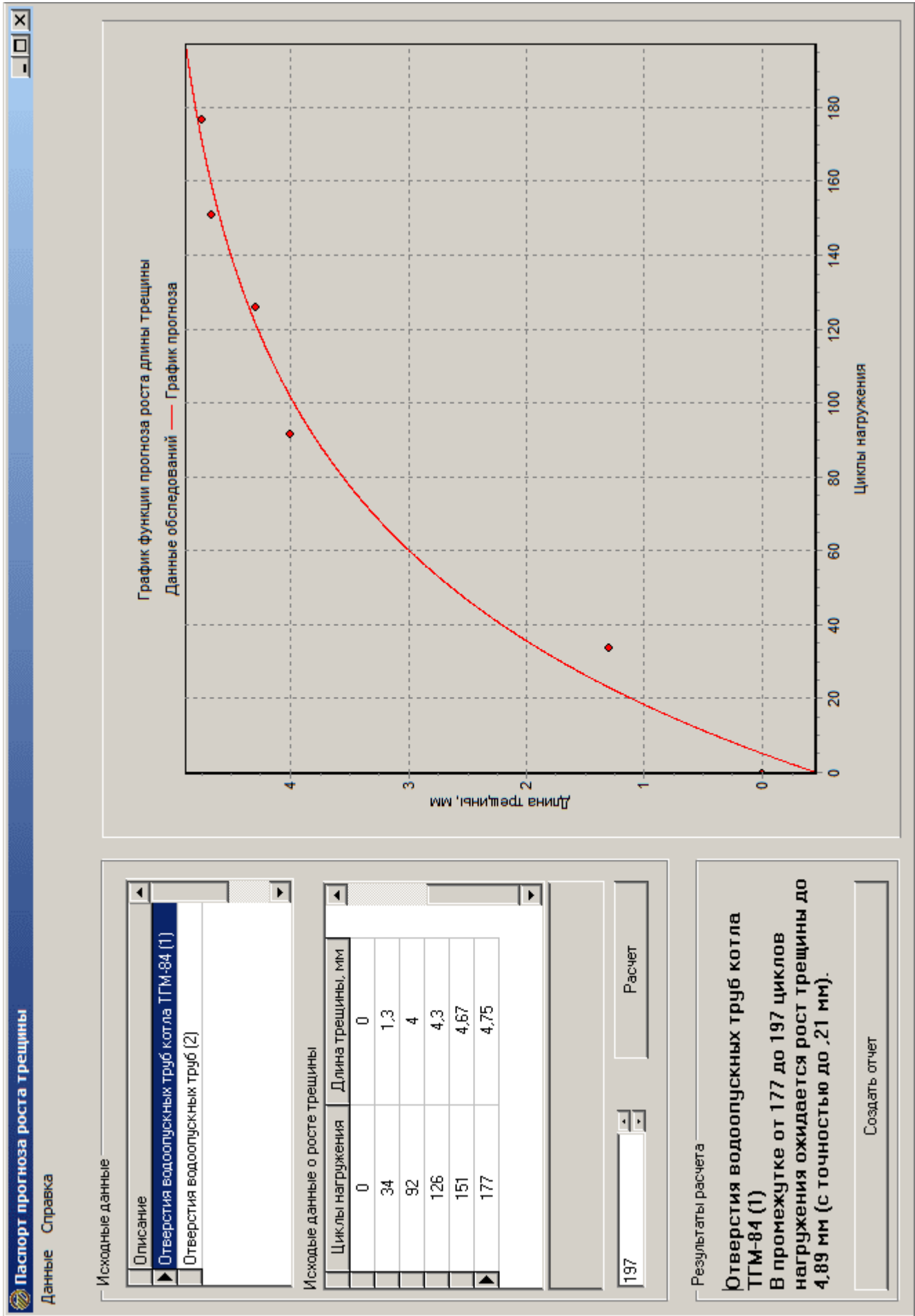


Рис. 9. Главное окно программы электронного паспорта прогноза роста трещин

Таблица 3. Результаты расчета глубины трещины

|                                    |       |
|------------------------------------|-------|
| Прогнозируемая глубина трещины, мм | 4,92  |
| Точность прогноза по расчету, мм   | 0,61  |
| Истинная глубина трещины, мм       | 4,75  |
| Погрешность прогноза $\Delta$      | 0,036 |

Как видно из таблицы, точность прогноза весьма удовлетворительна, причем она повышается при увеличении количества исходных данных.

Для организации обслуживания и ремонта оборудования в зависимости от его технического состояния в среде Delphi была разработана форма электронного паспорта прогноза роста трещин в необогреваемых элементах котлов. Окно программы показано на рис. 9. В паспорте отражаются:

- формулы для расчета средней прогнозируемой длины трещин и флуктуаций этой величины;
- таблица данных обследования, на основе которых определяются коэффициенты идентификации функции прогноза;
- результаты прогноза в виде кривых и значений коэффициентов идентификации.

### **ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ И РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ**

В результате выполненной работы создано новое средство прогноза сроков технического обслуживания трубопроводов и необогреваемых элементов паровых котлов. Конкретно получены следующие результаты:

1. Предложены динамические математические модели роста числа дефектов на трубопроводах и роста трещин на необогреваемых элементах паровых котлов, отражающие характерные особенности рассматриваемых процессов и основанные на полуэмпирических дифференциальных уравнениях. Коэффициенты идентификации этих уравнений определяются на основе регрессионного анализа результатов обследования конкретных единиц оборудования.

2. Для процесса роста повреждений на трубопроводах разработана и апробирована на конкретных элементах трубопроводов стохастическая математическая модель, позволяющая рассчитать не только среднее число дефектов, но и их флуктуации. Модель базируется на гипотезе о том, что рассматриваемый процесс является непрерывным во времени, но дискретным по числу дефектов Марковским процессом, подчиняющийся уравнению Колмогорова.

3. Разработана стохастическая математическая модель процесса роста трещин на необогреваемых элементах паровых котлов ТЭС. Наряду со средними значениями размера трещины, модель также позволяет определить и их флуктуации. При этом процесс роста трещины считается непрерывным Марковским процессом, подчиняющимся уравнению Фоккера-Планка.

4. Методом моментов на основе уравнений Колмогорова и Фоккера-Планка получены уравнения для среднего числа прогнозируемых дефектов и дисперсии распределения. Решения этих уравнений найдены в аналитической форме.

5. Результаты прогнозирования состояния конкретных единиц оборудования показал, что прогноз необходимо строить для каждого объекта индивидуально. Такой подход способствует повышению надежности и рабочего ресурса исследуемого оборудования.

6. На основе численных экспериментов по верификации функций прогноза по неполным данным видно, что на короткий срок (1-2 года) погрешность прогноза для трубопроводов составляет не более 10%, что является достаточно хорошим результатом.

7. В среде Delphi разработаны электронные паспорта прогноза состояния индивидуальных трубопроводов и динамики роста трещин на необогреваемых элементах паровых котлов ТЭС, позволяющие отслеживать состояние оборудования в течение всего срока его эксплуатации. Обновление и уточнение функций прогноза производится по мере поступления информации о вновь обнаруженных повреждениях оборудования.

### **Основные положения диссертации отражены в следующих работах:**

*в изданиях, рекомендованных ВАК:*

1. Семенов В.К., Беляков А. А. Прогнозирование количества повреждений сетевых трубопроводов и паропроводов ТЭС // Теплоэнергетика. 2010. №1. С. 34-39.

2. Семенов В.К., Беляков А.А., Щербнев В.С. К теории флуктуаций роста трещин в теплоэнергетическом оборудовании ТЭС и АЭС // Вестник ИГЭУ. 2009. №2. С. 46-48.

3. Семенов В.К., Степанов В.Ф., Беляков А.А., Щербнев В.С., Дерий В.П., Румянцев Д.С. Прогнозирование живучести энергетического оборудования стареющих электрических станций // Теплоэнергетика. 2010. №8. С. 35-39.

4. Семенов В.К., Беляков А.А., Щербнев В.С. Прогнозирование накопления дефектов на трубопроводах ТЭС и АЭС // Вестник ИГЭУ. 2009. №2. С. 48-51.

*в других изданиях:*

5. Семенов В.К., Беляков А.А. Прогнозирование повреждений паропроводов перегретого пара // Новое в российской электроэнергетике. 2009. №4. С. 23-29.

6. Семенов В.К., Беляков А.А. Об одном возможном механизме электрохимической коррозии // Тезисы докладов Международной научно-технической конференции «Состояние и перспективы развития электротехнологии» (XIV Бенардосовские чтения). Иваново. 2007. Т. 1. С. 205.

7. Семенов В.К., Беляков А.А., Щербнев В.С. Вариант определения количества повреждений на трубопроводах ТЭС и АЭС // Тезисы докладов Международной научно-технической конференции «Состояние и перспективы развития электротехнологии» (XV Бенардосовские чтения). Иваново. 2009. Т. 1. С. 192.

8. Семенов В.К., Беляков А.А., Щербнев В.С. К теории флуктуаций роста трещин в теплоэнергетическом оборудовании ТЭС и АЭС // Тезисы докладов Международной научно-технической конференции «Состояние и перспективы развития электротехнологии» (XV Бенардосовские чтения). Иваново. 2009. №1. С. 193.

9. Семенов В.К., Беляков А.А. О прогнозировании роста трещин в теплоэнергетическом оборудовании ТЭС и АЭС // Информационные технологии, энергетика и экономика. Сб. трудов 7-ой межрегиональной научно-технической конференции студентов и аспирантов. В 3 т. Т 1. 2010. С. 96.

10. Семенов В.К., Беляков А.А. Способ прогнозирования количества повреждений на трубопроводах ТЭС и АЭС // Тезисы IV научно-технической конференции «Ресурс и диагностика материалов и конструкций». Екатеринбург. 2009. С. 34.

11. Семенов В.К., Беляков А.А. Прогнозирование количества повреждений трубопроводов ТЭС // Шестьдесят третья региональная научно-техническая конференция студентов, магистрантов и аспирантов высших учебных заведений с международным участием, посвященная 1000-летию Ярославля. Ярославль. 2010. Ч.1: тез докл. С. 119.

12. Семенов В.К., Беляков А.А. Прогнозирование роста трещин в теплоэнергетическом оборудовании ТЭС // Тезисы IV научно-технической конференции «Ресурс и диагностика материалов и конструкций». Екатеринбург. 2009. С. 157.