

На правах рукописи



Поваров Владимир Петрович

**МЕТОДОЛОГИЯ ТЕХНИЧЕСКОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ
БЕЗОПАСНОЙ ЭКСПЛУАТАЦИИ ЯДЕРНО-ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ
УСТАНОВОК НА ПРИМЕРЕ АЭС С ВВЭР**

Специальность: 05.14.03 Ядерные энергетические установки, включая
проектирование, эксплуатацию и вывод
из эксплуатации

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
доктора технических наук

Москва 2020

Работа выполнена в ФГБОУ ВО «Воронежский государственный технический университет»

Научный консультант: **Данилов Александр Дмитриевич**, доктор технических наук, профессор

Официальные оппоненты: **Соловьев Сергей Леонидович**, доктор технических наук, профессор, АО «ВНИИАЭС», научный руководитель института
Пикина Галина Алексеевна, доктор технических наук, профессор, ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский университет «МЭИ», профессор кафедры автоматизированных систем управления тепловыми процессами
Полунин Виталий Иванович, доктор технических наук, профессор, ОКБМ им. И.И. Африкантова, главный специалист отдела подготовки научных кадров
Крюков Александр Михайлович, доктор технических наук, ФБУ «НТЦ ЯРБ», главный научный сотрудник отдела прочности

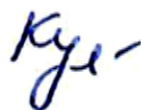
Защита диссертации состоится «13» мая 2020 г. в 14.30 часов на заседании диссертационного совета МИФИ.01.03 ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ» (115409, г. Москва, Каширское шоссе, 31).

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке НИЯУ МИФИ и на сайте <http://ods.mephi.ru>.

Отзывы на автореферат в двух экземплярах, заверенные печатью учреждения, просьба отправлять по адресу: 115409, г. Москва, Каширское шоссе, 31, Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ».

Автореферат разослан « » 2020 г.

Учёный секретарь
диссертационного совета МИФИ. 01.03
кандидат физико-математических
наук



Куликов Е.Г

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. Бурное развитие ядерной энергетики требует применения новых подходов к повышению эффективности и надежности функционирования оборудования АЭС в реальных производственных условиях, использующих различные научно-технические решения, в том числе моделирование тепловых и механических процессов, создание специализированных программных комплексов, обеспечивающих расчетно-экспериментальное обоснование безопасной работы ядерных энергетических установок (ЯЭУ), что особенно важно, при продлении срока эксплуатации ядерного блока

Характерной особенностью работы АЭС является то, что любой энергоблок представляет собой динамический объект с большой вероятностью появления в процессе эксплуатации внештатных ситуаций, не предусмотренных на этапах проектирования. Продление срока службы ядерных блоков поставило вопрос об организации эксплуатационного контроля на соответствие регламентным нормам ПНАЭ Г-7-008-89 прочностных характеристик оборудования ЯЭУ. Нормы включают данные по физико-механическим свойствам материалов конструкций, расчет на статическую, длительную циклическую, вибрационную прочность, данные по пластичности, ползучести и сейсмоустойчивости, а также ограничения по необратимым изменениям физико-механических свойств материалов в эксплуатационных условиях. Такая экспертная расчетно-экспериментальная работа должна строиться на максимально достоверной оценке фактического состояния оборудования с использованием самых передовых методических подходов и программно-аппаратных средств технической диагностики и контроля.

Следует отметить, что в рамках типового проекта АЭС не предусмотрена реализация систем неразрушающего контроля дефектности и диагностики фактической термосиловой нагруженности наиболее проблемного оборудования, при этом в процессе эксплуатации АЭС были зарегистрированы однотипные повреждения ответственного оборудования, что побуждает рассматривать данное явление как системное, имеющее общие причины.

Для решения данных проблем требуется разработка новых методов для обеспечения безопасной эксплуатации оборудования АЭС, в том числе создание общей методологии, позволяющей принимать решения о возможности дальнейшего использования проблемного оборудования на основе оперативных данных, полученных от систем неразрушающего контроля и диагностики критических зон ядерно-энергетического оборудования, прогнозировать развитие аварийных ситуаций, предлагать компенсирующие меры по их предотвращению и принимать решения по срокам эксплуатации ЯЭУ или всего ядерного блока в целом.

Степень научной разработанности темы. В настоящее время вопросам анализа данных, функционирования систем диагностики и контроля параметров работы ядерных энергетических установок посвящено большое количество

исследований. Здесь следует отметить работы Аркадова Г.В., Павелко В.И., Финкеля Б.М. Существенным недостатком этих разработок является то, что в них отсутствует единая методология принятия решений в условиях обнаружения дефектов. Разработка методов принятия решений при непрерывном контроле и управлении блоками АЭС представлена в работах Еремеева А.П., Геловани В.А., Прангишвили И.В., Бакирова М.Б., Киселева А.С., Башлыкова А.А. Однако вопросы формализации взаимосвязей физических явлений и повреждений в ядерных энергетических установках и задач организации оперативного анализа информации, поступающей от систем многопараметрического неразрушающего контроля и диагностики, в них не достаточно проработаны в теоретическом плане.

Решение данной проблемы, в первую очередь, заключается в разработке и внедрении новых подходов к исследованию поведения ЯЭУ в процессе функционирования на основе данных, полученных от систем неразрушающего контроля и диагностики ответственного оборудования АЭС, для оперативной оценки повреждаемости наиболее нагруженных зон, прогнозирования развития дефектов и принятия решения о возможности или предельных сроках дальнейшей эксплуатации.

Таким образом, актуальность темы диссертационной работы обусловлена необходимостью дальнейшего развития теоретических основ методологии технического обеспечения безопасной эксплуатации ЯЭУ, подверженных эксплуатационному разрушению, с использованием математического аппарата, ориентированного на создание моделей и алгоритмов идентификации и численного расчета параметров физико-механических процессов в конструкциях оборудования, прогнозирования динамики развития дефектов и принятия оперативных управленческих решений на основе формального анализа их текущих и прогнозных значений.

Целью диссертационного исследования является развитие теоретических основ методологии и разработки технического обеспечения ЯЭУ АЭС в условиях длительных и сверхпроектных сроках эксплуатации с целью повышения надежности эксплуатации и обеспечения ресурса оборудования, необходимого для безопасного функционирования АЭС.

Задачи исследования. Для достижения данной цели в работе решались следующие задачи:

- анализ существующих методов и систем неразрушающего контроля и диагностики ядерно-энергетических установок (ЯЭУ) современных АЭС;
- анализ физических особенностей повреждаемости критических элементов оборудования энергоблока и разработка алгоритма численного расчета параметров механического разрушения для пространственных трещин;
- разработка методики идентификации потенциально опасных явлений в критических элементах энергоблока с учетом трехмерного напряженно-деформированного состояния (НДС) диагностируемого узла;

- разработка методологии многопараметрического расчетно-экспериментального контроля и мониторинга критических зон оборудования АЭС;
- разработка методики определения остаточного ресурса оборудования на основе информативных параметров от системы непрерывного многопараметрического контроля и мониторинга для задач управления сроком службы АЭС;
- разработка концептуальной модели безопасной эксплуатации объектов ядерной энергетики на основе расчетных проектных нагрузок, нарушениях нормальных условий эксплуатации и прогноза накапливаемой повреждаемости в течении срока службы объекта контроля;
- разработка системы поддержки принятия решений оператором ядерного блока, интегрированной с системой непрерывного контроля и диагностики эксплуатационной повреждаемости оборудования АЭС;
- разработка методики нейропрогнозирования динамики физических параметров диагностируемого объекта на основе ANFIS-подобных нейросетей;
- разработка методики процесса принятия управленческих решений на основе формального анализа текущих и прогнозных значений параметров состояния оборудования в условиях непрерывного контроля критических зон оборудования ЯЭУ;
- разработка программного комплекса системы многопараметрического непрерывного контроля и диагностики эксплуатационной повреждаемости конструктивных элементов оборудования и поддержки принятия решений для безопасного функционирования АЭС;
- практическая апробация системы многопараметрического неразрушающего контроля и диагностики в реальных условиях эксплуатации потенциально опасного оборудования НВ АЭС.

Объект исследования: процессы непрерывного контроля и диагностики состояния критических узлов оборудования ЯЭУ с целью определения остаточного ресурса оборудования и принятия решений для безопасной эксплуатации энергоблока АЭС.

Предмет исследования: динамика деструктивных процессов в критических элементах оборудования на основе результатов расчетно-экспериментальных методов и данных непрерывного неразрушающего контроля, диагностики и мониторинга.

Методы исследования основаны на использовании теории механики разрушения, теплофизики, математического моделирования, нечётких нейронных сетей, теории вероятностей и матстатистики.

Соответствие диссертации паспорту специальности.

П.1. Моделирование нейтронно-физических, химических, тепловых, гидравлических и механических процессов, создание программных комплексов,

обеспечивающих расчетное обоснование облика и безопасного функционирования объектов ядерной техники.

П.2. Экспериментальные исследования в реакторных условиях и вне реакторов свойств и характеристик материалов, конструкций, оборудования и систем с целью выявления закономерностей их изменения в течение жизненного цикла объектов ядерной техники.

П.5. Разработка методов управления сроком службы объектов ядерной техники.

Научная новизна:

В диссертационной работе с позиций общей методологии исследования впервые получены следующие результаты, характеризующиеся научной новизной:

- разработана формализованная структура состава энергоблока АЭС с детализацией эксплуатационной повреждаемости оборудования до уровня критических элементов (зон) и возможностью проведения анализа образующихся дефектов независимо от принадлежности к конкретной энергетической установке;

- разработана методика параметрической идентификации механического разрушения для пространственных трещин в критических элементах ЯЭУ в блоках с ВВЭР, отличающаяся возможностью вычисления параметров процесса механического разрушения для трещины произвольной геометрии по результатам конечно-элементного расчета НДС конструкции, содержащей трещину;

- разработана иерархическая структура системы неразрушающего многопараметрического непрерывного контроля и диагностики ЯЭУ, позволяющая в реальном времени формировать картину распределения механических напряжений в критической зоне в любой момент времени на основе фактических параметров нагружения, и формировать обоснованный прогноз по долговечности и живучести исследуемого объекта;

- разработана методология многопараметрического анализа технического состояния ЯЭУ и численного исследования накопления эксплуатационной повреждаемости, характерной особенностью которой является применение сравнительного анализа расчетных и экспериментальных данных для обеспечения достоверности результатов, что позволяет определять причины высокой непроектной эксплуатационной нагруженности и предлагать оптимальные мероприятия по снижению эксплуатационной повреждаемости;

- разработана методика определения интенсивности отказов и перехода в предельное состояние объекта при управлении сроком службы, основывающаяся на исследовании зон с повышенной повреждаемостью, контроле динамики образования и роста дефектов непосредственно в процессе эксплуатации;

- разработана методика расчета нелинейного напряженно-деформированного состояния в критических зонах ЯЭУ, реализуемая в формате сложной краевой задачи с решением в трехмерной постановке;

- разработана структура системы поддержки принятия решений оператором ядерного блока на основе данных непрерывного контроля параметров эксплуатационной повреждаемости критических элементов ЯЭУ;

- разработана методика принятия управленческих решений оператором блока на базе текущих и прогнозных значений информативных параметров о состоянии критических элементов с тройным дублированием процесса формирования набора рекомендуемых действий;

- разработана структура программного комплекса системы поддержки принятия решений в рамках систем верхнего блочного уровня управления АЭС с ВВЭР на основе данных непрерывного контроля параметров эксплуатационной повреждаемости критических элементов энергетического оборудования.

Практическая значимость работы. Предложенная в работе методология, основанная на использовании информативных данных от систем неразрушаемого многопараметрического контроля и диагностики параметров критических элементов оборудования АЭС, подверженных эксплуатационной повреждаемости в результате непроектных напряженно-деформирующих нагрузок, и прогнозного анализа динамики дефектообразования, а также средства их информационной поддержки реализованы в виде специального программного комплекса, ориентированного на использование в рамках системы управления в составе средств верхнего блочного уровня.

Реализация результатов работы для решения задач обеспечения безопасного функционирования ядерного блока на базе использования данных систем многопараметрического неразрушающего контроля и диагностики, проектирования ядерных энергетических установок позволяет разработать эффективные компенсирующие мероприятия, направленные на снижение влияния основных повреждающих факторов и повышение эксплуатационной долговечности ЯЭУ АЭС. Использование разработанного информационного программно-технического комплекса позволило исключить появление дефектов в узлах приварки коллекторов парогенераторов (ПГ) к патрубкам ДУ1200 в режиме продленного срока эксплуатации 5 блока Нововоронежской АЭС и завершить работы по повторному продлению срока действия для 4 блока.

На основе патента на изобретение № 2574578 (авторы Бакиров М.Б., Поваров В.П.) в НИЦ «Контроля и диагностики технических систем» был разработан ГОСТ Р 57154-2016 - Техническая диагностика. Мониторинг тепломеханического оборудования АЭС. Расчетно-экспериментальный метод.

Разработанная в рамках диссертационного исследования система была рекомендована МАГАТЕ (International Atomic Energy Agency. Plant life models for long term operation of nuclear power plants. Vienna, Austria. May 2015, P.81-84) в качестве базовой для применения в атомной энергетике.

Положения, выносимые на защиту:

1. Формализованное представление задачи обеспечения высокого

уровня безопасности эксплуатации потенциально опасных объектов АЭС путем повышения качества и надежности принимаемых решений, направленных на компенсацию основных повреждающих факторов и повышение эксплуатационной долговечности мониторируемого объекта.

2. Оригинальная методика идентификации потенциально опасных физических процессов в критических элементах энергоблока с учетом трехмерного напряженно-деформированного состояния диагностируемого узла.

3. Программный комплекс для системы технического обеспечения безопасной эксплуатации АЭС и расчетно-экспериментального анализа эксплуатационной повреждаемости ядерно-энергетического оборудования, интегрированный в систему верхнего блочного уровня.

4. Методика обеспечения безопасной эксплуатации ядерного блока АЭС на основе текущих и прогнозных значений технологических параметров, полученных в процессе контроля и мониторинга состояния критических элементов оборудования ЯЭУ.

5. Результаты комплексных исследований напряженно-деформированных критических зон ЯЭУ и разработка компенсирующих мероприятий по снижению их эксплуатационной повреждаемости.

6. Результаты анализа практической апробации методологии технического обеспечения безопасной эксплуатации ЯЭУ в реальных условиях на Нововоронежской АЭС.

Реализация результатов работы:

Результаты научных исследований внедрены на Нововоронежской АЭС, Балаковской АЭС, Ростовской АЭС (филиалы АО «Концерн Росэнергоатом»), в «Научно-сертификационном центре материаловедения и ресурса компонентов ядерной техники» в виде программно-технического комплекса системы непрерывного контроля эксплуатационной повреждаемости критических элементов оборудования ЯЭУ (СНМЭП). Практическая реализация комплекса осуществлена для контроля фактической эксплуатационной нагруженности в местах сварных соединений коллекторов ПГ к патрубку ДУ1200 (СС№111) в вариантах ультразвукового и акустико-эмиссионного контроля, для контроля температурной стратификации дыхательного трубопровода компенсатора давления, для контроля и мониторинга защитной оболочки (контейнмента) ядерного реактора.

Кроме того, результаты исследования внедрены в учебный процесс факультета энергетики и систем управления Воронежского государственного технического университета.

Апробация результатов работы. Основные положения диссертационной работы докладывались и обсуждались на следующих научно-практических конференциях: Международной научно-технической конференции «Новые технологии в научных исследованиях, проектировании, управлении, производстве»

(НТ 2019) (Воронеж, 2019); Международной научно-технической конференции «55 лет безопасной эксплуатации АЭС с ВВЭР в России и за рубежом» (Нововоронеж, 2019); 13th International Conference on Electromechanics and Robotics "Zavalishin's Readings" (ER(ZR)-2018) (St. Petersburg, Russia, 2018); 68-й Международной конференции «Ядро 2018» «Фундаментальные проблемы ядерной физики, атомной энергетики и ядерных технологий» (Воронеж, 2018); Международной научно-практической конференции «Альтернативная и интеллектуальная энергетика» (Воронеж, 2018); VI-XI Международных научно-технических конференциях «Безопасность, эффективность и экономика атомной энергетики» (Москва, 2008-2018 гг.); Международной научно-технической конференции «Новые технологии в научных исследованиях, проектировании, управлении, производстве» (НТ 2017) (Воронеж, 2017); 14-й Международной конференции «Проблемы материаловедения при проектировании, изготовлении и эксплуатации оборудования АЭС» (Санкт-Петербург, 2016), 9-й Международной научно-технической конференции «Обеспечение безопасности АЭС с ВВЭР» (Подольск, 2015); Международной научно-технической конференции «Полувековое обеспечение безопасности АЭС с ВВЭР в России и за рубежом» (Нововоронеж, 2014); 3rd International Conference on NPP Life Management (PLIM) for Long Term Operations (LTO) (Salt Lake City, UT, USA, 2012), а также на научных семинарах кафедры электропривода, автоматики и управления в технических системах Воронежского государственного технического университета (2013-2018 г.).

Личный вклад. В диссертации представлены теоретические результаты, выполненные лично автором или в соавторстве под его непосредственным руководством.

Публикации. Результаты выполненных в диссертации исследований изложены в 74 печатных изданиях, в том числе: 65 статей в журналах и сборниках, 31 публикация проиндексирована в базе Scopus, 6 – в базе Web of Science, 67 – в РИНЦ, 38 в журналах, рекомендованных ВАК по специальности 05.14.03, 3 патента на изобретение, 3 свидетельства о регистрации программных комплексов для ЭВМ, 1 монография.

Структура и объём работы. Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения, списка литературы. Основное содержание диссертации изложено на 233 страницах, в том числе 87 рисунков, 14 таблиц; в дополнение к основной части оформлено 3 приложения на 51 странице. Библиографический список включает 168 наименований.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы исследования, определены цели и задачи работы, научная новизна, практическая значимость, отмечены основные результаты исследования, выносимые на защиту, приведены сведения об апробации работы, внедрении, а также основное содержание работы.

В первой главе приведен критический анализ существующих методов контроля и диагностики оборудования ЯЭУ современных АЭС, основанных на концепции комплексной диагностики, представляющей собой набор инструментальных средств, интегрирующих с помощью локальных сетей различные функционально законченные диагностические системы. Подробно рассмотрены локальные системы диагностики, применяемые на 6 блоке Нововоронежской АЭС, основанные на следующих методах: контроля тепловых полей и перемещений основного оборудования (выработка ресурса); контроля акустического шума в полосе частот $100 \div 400$ кГц (определение места течи); контроля флюктуаций давления, нейтронного потока (внутри и вне активной зоны); вибрации основного оборудования 1 контура; контроля акустического шума в полосе частот $1 \div 10$ кГц (обнаружение свободных предметов); контроля мощности при открытии/закрытии электроприводной арматуры; виброконтроля.

Представлен критический анализ СПРИНТ-технологии построения систем поддержки принятия решений реального времени на современных АЭС. Показано, что при разработке таких систем необходимо учитывать слабую структуризацию проблем данной предметной области и необходимость принятия решений в условиях неполной и нечеткой исходной информации.

Рассмотрена структура общей системы контроля и управления АЭС и предложен вариант интеграции в нее систем неразрушающего контроля, диагностики и принятия решений в критических ситуациях, см. рис. 1.



Рис. 1. Укрупненная структурная схема систем контроля и управления АЭС

На основании проведенного анализа и обозначенных проблем были сформулированы цели и задачи диссертационного исследования, в основе которых лежит задача разработки и развития методологии многопараметрической on-line диагностики критических элементов АЭС при длительных и сверхпроектных сроках эксплуатации с целью повышения надежности и обеспечения ресурса оборудования, необходимого для безопасного функционирования АЭС.

Во второй главе рассмотрен комплекс вопросов, связанных с анализом проблем эксплуатационной повреждаемости оборудования АЭС, разработкой математических моделей и алгоритмов идентификации потенциально опасных процессов в критических зонах оборудования объектов ядерной энергетики. Проанализированы физические особенности повреждаемости критических элементов оборудования ЯЭУ. Предложены основные концепции использования системы многопараметрического неразрушающего контроля, диагностики и мониторинга состояния критических зон оборудования, подверженных эксплуатационному повреждению. Такой подход объединяет возможности неразрушающего контроля наиболее нагруженных зон, диагностики фактической термосиловой нагруженности и расчетного анализа прочности и остаточного ресурса исследуемого оборудования.

Поскольку на лабораторных моделях невозможно воспроизвести фактические напряжения и параметры среды в зоне повреждения, следовательно нельзя рассчитать остаточный ресурс оборудования с необходимой точностью. Оценка фактического уровня НДС в зоне разрушения оборудования определяется конструктивными особенностями и технологическими параметрами эксплуатации. Поэтому, оценку термосиловой нагруженности можно воспроизвести только в процессе эксплуатации на самом оборудовании. Это - *первый постулат*, лежащий в основе реализуемого подхода. *Второй постулат* – верификация расчетной модели по экспериментальным данным для корректного прочностного расчета. *Третий постулат* предлагаемой методологии – непрерывный мониторинг дефектности в наиболее нагруженных зонах оборудования с контролем температур, деформаций, перемещений, технического состояния оборудования АЭС.

С целью детального анализа причинно-следственных связей возникновения эксплуатационных несплошностей в критических зонах оборудования была проведена декомпозиция состава ядерного блока с детализацией до нижнего уровня критических элементов оборудования для реакторного, турбинного отделений и для общестанционных систем. При этом наибольший интерес для непрерывного контроля представляют зоны оборудования, подверженные механическим повреждениям.

В качестве примера приведен анализ критической повреждаемости сварных соединений дыхательного трубопровода компенсатора давления (КД) и оценка его остаточного ресурса при термической стратификации в период продленного срока

эксплуатации энергоблока №5 НВАЭС (рис. 2). Термическая стратификация представляет собой явление расслоения потока теплоносителя на холодный нижний слой и горячий верхний слой, что приводит к дополнительным термосиловым нагрузкам из-за градиентов температур. Сварные соединения дыхательного трубопровода КД - критические зоны, где периодические термосиловые нагрузки приводят к накоплению усталостного повреждения металла в наиболее нагруженных зонах трубопровода, вплоть до образования и развития трещин.

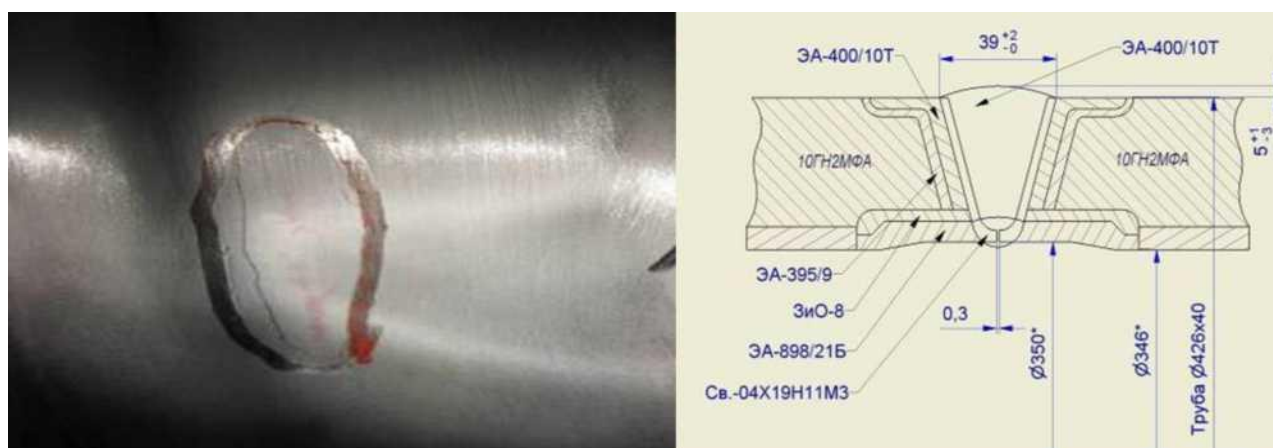


Рис. 2. Дефект композитного сварного соединения №7 дыхательного трубопровода компенсатора давления 5-го блока НВАЭС

Для вычисления влияния деформаций на величину трещины нужно получить решение упругопластической задачи о поле напряжений при вершине трещины. Для этого используется применяемый в механике разрушения интеграл Черепанова-Райса J_k . Геометрическая модель фрагмента трещины представлена на рис. 3.

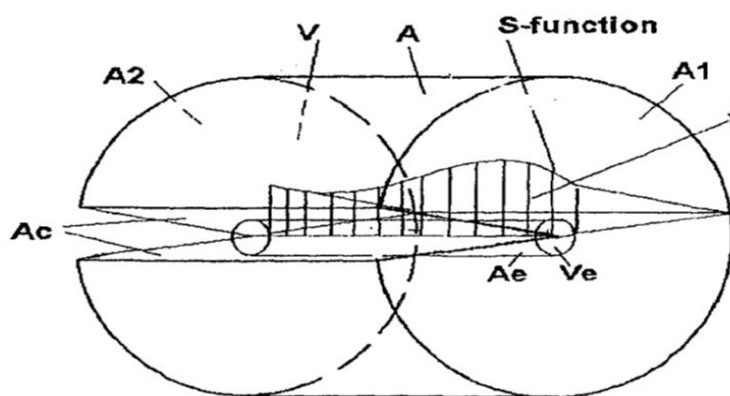


Рис. 3. Геометрическая модель фрагмента трещины

Величина интеграла определяется как интеграл по поверхности трубки, коаксиальной линии фронта трещины, протяженностью Δ .

$$J_k = \frac{1}{\Delta} \lim_{e \rightarrow 0} \int_{A_e} (W n_k - \sigma_{ij} \frac{\partial U_i}{\partial X_k} n_j) dA, \quad k = 1, 2, \quad ,$$

где U_i, σ_{ij} - компоненты вектора перемещений и тензора напряжений, e - радиус трубки, n_j - компоненты вектора внешней нормали к поверхности A_e , W - плотность работы напряжений на механической части деформаций.

Для расчета интеграла применялся метод ЭОИ. Для этого вводится понятие безразмерной S -функции, равной 0 на внешней поверхности объема, окружающего трещину. Переходя от интегрирования по поверхности к интегрированию по объему, после преобразования получим выражение для вычисления компонентов интеграла.

$$\begin{aligned} J_k &= J_k(S) + J_k(W) \\ J_k(S) &= -\frac{1}{f} \int_{V-V_e} (W \cdot \frac{\partial S}{\partial X_k} - \sigma_{ij} \cdot \frac{\partial U_i}{\partial X_k} \cdot \frac{\partial S}{\partial X_j}) dV \\ J_k(W) &= -\frac{1}{f} \int_{V-V_e} (\frac{\partial W}{\partial X_k} - \sigma_{ij} \cdot \frac{\partial \varepsilon_{ij}}{\partial X_k}) S dV, \end{aligned}$$

где f - площадь S -функции на поверхности A_e .

Данные уравнения можно использовать при расчетах параметров как линейных, так и нелинейных процессов деструктивной механики.

Новый подход к прогнозированию остаточного ресурса оборудования основан на использовании многопараметрического расчетно-экспериментального контроля и мониторинга повреждаемости оборудования в процессе эксплуатации АЭС. Модель прочностного расчета верифицируется по реальным данным эксплуатации, организован непрерывный контроль состояния наиболее нагруженных зон оборудования, включающий контроль температуры, деформаций, перемещений.

На рис. 4 представлена блок-схема алгоритма многопараметрического мониторинга технического состояния оборудования АЭС.

Расчетная программа выполнена с возможностью калибровки трехмерной конечно-элементной (КЭ) модели по данным от датчиков, установленных в критических зонах. Параллельно с получением диагностических данных, записываемых в процессе непрерывного контроля, системой выполняется расчетно-экспериментальное обоснование прочности и долговечности критической зоны на базе КЭ расчетной модели.

В работе была разработана методика определения интенсивности отказов и перехода в предельное состояние при управлении сроком службы. Здесь уровень поврежденности оценивается относительным числом циклов нагружения (усталость), относительной накопленной пластической деформацией (длительное статическое нагружение, ползучесть). В этом случае для расчета

остаточного ресурса критических элементов необходимо проведение комплексных исследований условий и характера нагружения, характеристик механических свойств, особенностей напряженно-деформированного состояния, исходной дефектности и эксплуатационной повреждаемости. Эти данные можно оперативно получить, используя методику многопараметрической on-line диагностики.

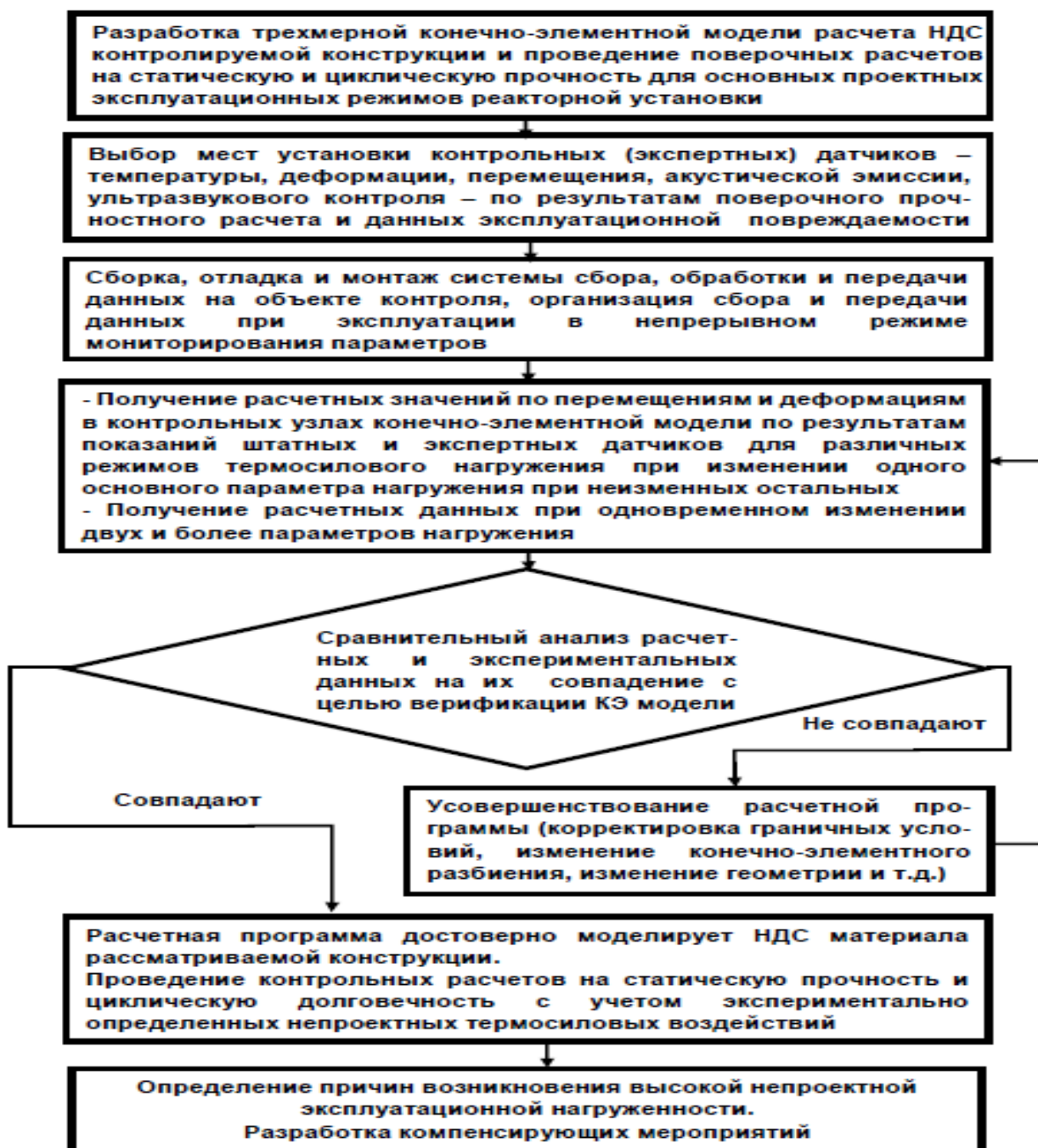


Рис. 4. Блок- схема алгоритма многопараметрического контроля и мониторинга технического состояния и расчетного анализа накопления эксплуатационной повреждаемости

В диссертации предложена концепция безопасной эксплуатации объектов ядерной энергетики. В ее основу положен расчет проектных нагрузок, нарушений нормальных условий эксплуатации и прогноз накапливаемой повреждаемости в течении срока службы объекта контроля.

Решение задачи расчета НДС в конструкционных элементах ЯЭУ, находящихся под тепловыми и механическими воздействиями, невозможно в аналитическом виде. Для решения этой проблемы в работе был использован численный метод решения задач механики сплошной среды, метод конечных элементов (МКЭ).

Одной из характерных особенностей работы критических элементов оборудования ядерной установки является воздействие на них нестационарных температурных полей.

Динамика процесса переноса тепла может быть описана квазигармоническим уравнением в частных производных:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(K_x \cdot \frac{\partial \phi}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(K_y \cdot \frac{\partial \phi}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(K_z \cdot \frac{\partial \phi}{\partial z} \right) + Q = \lambda \cdot \frac{\partial \phi}{\partial t} ,$$

где ϕ - функция распределения температуры; K_x, K_y, K_z - коэффициенты теплопроводности; Q - интенсивность тепла от внутреннего источника; λ - параметр, характеризующий тип материала (произведение удельной теплоемкости на плотность); $\partial \phi / \partial t$ - динамический коэффициент нестационарности задачи.

Граничные условия здесь выглядят в виде конкретных значений температуры $\phi = \phi_B$ на части границы исследуемой области ($S1$) и (или) задании на оставшейся части границы условия:

$$\left(K_x \cdot \frac{\partial \phi}{\partial x} \right) l_x + \left(K_y \cdot \frac{\partial \phi}{\partial y} \right) l_y + \left(K_z \cdot \frac{\partial \phi}{\partial z} \right) l_z + q + h \cdot (\phi - \phi_B) = 0 ,$$

где l_x, l_y, l_z - направляющие косинусы нормали к поверхности; q - тепловой поток на части поверхности; h - коэффициент теплоотдачи; ϕ - температура среды, контактирующей с исследуемой частью границы.

В результате минимизации функционала, соответствующего граничным условиям, получаем систему линейных дифференциальных уравнений 1 порядка относительно вектора узловых значений температуры $\{\phi\}$:

$$[C] \cdot \partial \phi / \partial t + [K] \cdot \{\phi\} + \{F\} = 0 ,$$

где $[C]$ - матрица демпфирования; $[K]$ - матрица теплопроводности конечного элемента; $\{F\}$ - вектор нагрузки критического элемента.

Расчет матриц $[C]$, $[K]$, $\{F\}$ проводится аналогично расчету матриц жесткости

конечных элементов с использованием процедуры численного интегрирования по Гауссу. Методика расчета кинетики НДС элементов конструкции, имеющих пространственную геометрию, заключается в следующем.

Краевая задача в трехмерной постановке описывается статическими уравнениями равновесия; уравнениями совместности деформаций, связывающих перемещения и деформации в любой точке; и уравнениями, связывающими компоненты напряжений и деформаций.

В качестве граничных условий задаются силовые граничные условия для проекций сил на координатные оси X_v, Y_v, Z_v ; геометрические граничные условия $U = const, V = const, W = const$; перемещения нормальные к плоскости симметрии приравниваем нулю; смешанные граничные условия (на одной части – силовые граничные условия, а на другой – геометрические).

Такой подход позволяет получить решение задачи нестационарной теплопроводности, для областей, имеющих пространственную геометрию, с учетом свойств материалов.

Для построения основных уравнений МКЭ вводится понятие матрицы упругости, связывающей компоненты тензора деформации и повреждений, когда свойства в 3-х взаимно перпендикулярных направлениях различны. Матрица упругости имеет вид:

$$[D]^{-1} = \begin{bmatrix} 1/E_x & -\mu_{xy}/E_y & -\mu_{xz}/E_z & 0 & 0 & 0 \\ & 1/E_y & -\mu_{yz}/E_z & 0 & 0 & 0 \\ & & 1/E_z & 0 & 0 & 0 \\ & & & 1/G_x & 0 & 0 \\ & & & & 1/G_y & 0 \\ & & & & & 1/G_z \end{bmatrix}.$$

При этом, напряжения определяются в виде

$$[\sigma] = [D] \cdot ([\varepsilon] - [\varepsilon_0]) + [\sigma_0],$$

где $[\sigma], [\varepsilon]$ - тензоры напряжений и деформаций; $[\sigma_0], [\varepsilon_0]$ - тензоры начальных напряжений и деформаций.

Связь между обобщенными узловыми усилиями и узловыми перемещениями в элементе определяется по формуле:

$$\{F\}^e = [K]^e \cdot \{\delta\}^e + \{F_p\}^e + \{F_{\varepsilon 0}\}^e + \{F_{\sigma 0}\}^e,$$

где $\{F\}^e$ – вектор-столбец узловых усилий; $[K]^e$ - матрица жесткости элемента; $\{F_p\}^e$ - приведенная узловая нагрузка от действия объемных сил; $\{F_{\varepsilon 0}\}^e$ - силы, обусловленные начальными деформациями; $\{F_{\sigma 0}\}^e$ - силы,

обусловленные начальными напряжениями.

Просуммировав вклады от каждого конечного элемента, получим систему линейных алгебраических уравнений

$$[K] \cdot \{\delta\} = \{P\} ,$$

где $\{P\}$ - вектор приведенных узловых нагрузок, $[K]$ - матрица жесткости конечно-элементной модели.

Решая эту систему, получаем значения узловых перемещений, которые позволяют определить напряжения и деформации в каждом КЭ.

В случае проведения расчетов конструкций с большим количеством узлов применяется метод суперэлементов, т.е. полная конструкция – это совокупность соподчиненных конструкций. Полный вектор узловых перемещений представлен в виде суперпозиции 2-х состояний:

$$\{q\} = \{q^1\} + \{q^2\}$$

где $\{q^1\}$ - вектор узловых перемещений СЭ, вызванный нагрузками $\{P_i\}$, которые приложены к внутренним узлам; $\{q^2\}$ - вектор узловых перемещений СЭ, вызванный перемещениями граничных узлов $\{q_s\}$. Здесь $\{q_i\}$ и $\{q_s\}$ векторы перемещений, соответственно, внутренних и граничных узлов, $\{P_i\}$ и $\{P_s\}$ – векторы нагрузок, приложенных, соответственно, к внутренним и граничным узлам.

Значение узловых перемещений 2-го состояния определяется через перемещения граничных узлов с помощью F -матрицы формы суперэлемента:

$$[F] = \begin{bmatrix} -[K_{ii}]^{-1} & [K_{is}] \\ [E] \end{bmatrix}$$

где $[K_{ii}]$ - блок матрицы жесткости.

Вектор узловых усилий и матрица жесткости определяют алгоритм построения алгебраической модели суперэлемента.

$$\begin{aligned} [k] &= [K_{ss}] - [K_{si}] \cdot [K_{ii}]^{-1} \cdot [K_{is}] = [F]^T \cdot [K] \cdot [F] \\ \{P\} &= \{P_s\} - [K_{si}] \cdot [K_{ii}]^{-1} \cdot \{P_i\} = [F]^T \cdot \{P\} \end{aligned} .$$

Таким образом, суперэлемент, определяя поведение подструктуры через параметры в граничных узлах, обладает только теми свойствами подструктуры, которые полностью описывают взаимодействие суперэлементов при их сборке.

Третья глава посвящена разработке структуры и методики поддержки

принятия решений оперативным персоналом в условиях аварийных ситуаций при эксплуатации объектов ядерной энергетики на базе СНМЭП (рис. 5).

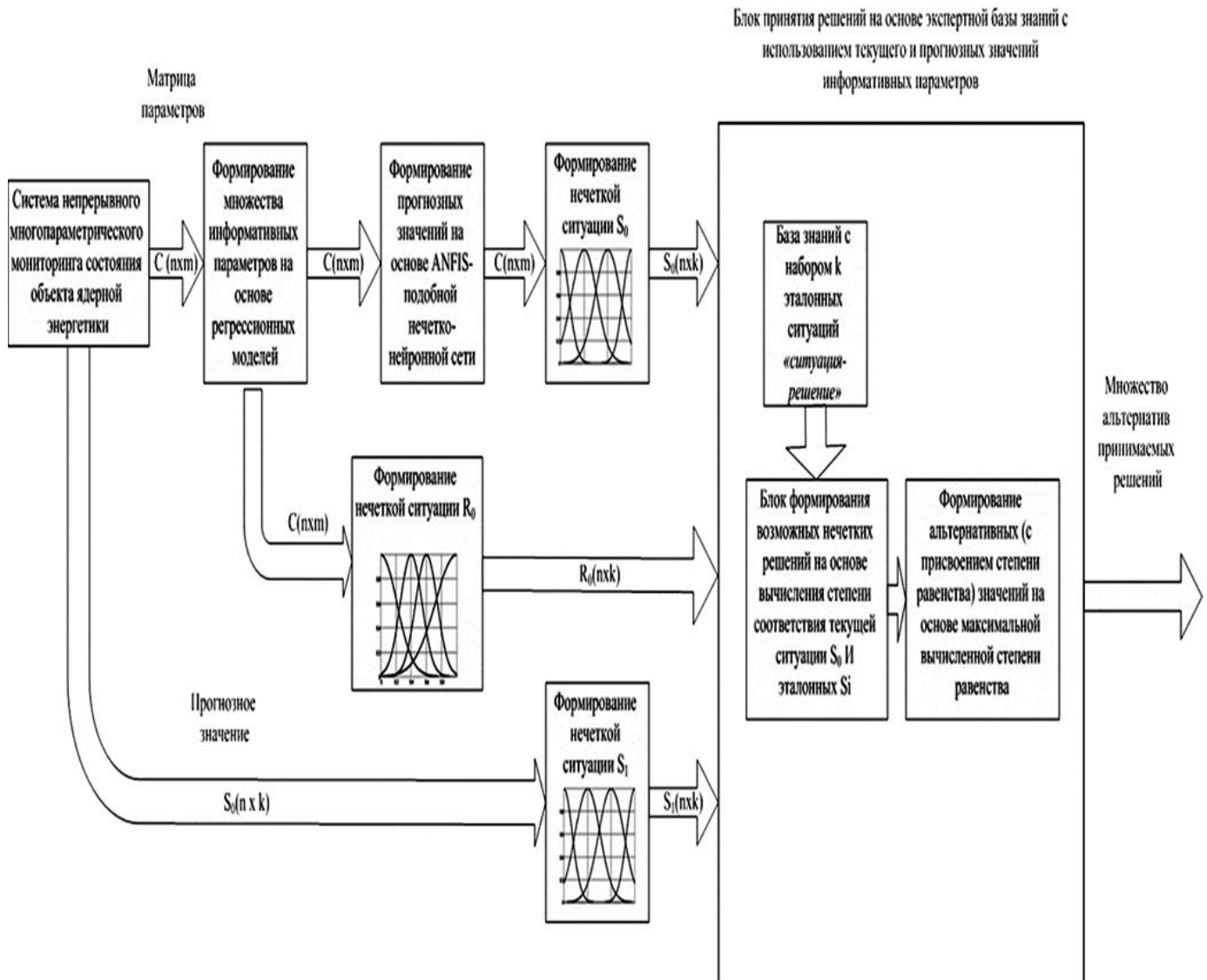


Рис. 5. Обобщенная структура системы поддержки принятия решений.

Структурно в ней можно выделить четыре функциональных блока:

- система непрерывного многопараметрического контроля и мониторинга состояния объекта ядерной энергетики. Является источником информативных параметров для принятия решений в критических ситуациях;
- блок анализа входных данных и устранения проблем неполноты информации на основе реализации многомерных регрессионных моделей. Данный блок обрабатывает поступающую на его вход матрицу значений информативных параметров, зависящих от дискретного времени поступления данных в блок многопараметрического мониторинга и имеющих корреляцию между собой;

- блок прогнозирования. Данный блок реализован на основе ANFIS-подобной нечетко-нейронной сети, которая используется для формирования прогноза остаточного ресурса оборудования, который служит для принятия решений по безопасной эксплуатации ЯЭУ АЭС. ANFIS (Adaptive Network-based Fuzzy Inference System) - адаптивная сетевая нечеткая система вывода, обучаемая классическими градиентными алгоритмами. Эта сеть является универсальным аппроксиматором. Кроме прогнозирования данный блок включает в себя модуль обучения и модуль модификации параметров функционирующей сети;

- блок принятия решений. Функционирует на основе экспертной базы знаний с использованием текущих и прогнозных значений информативных данных. Данный блок реализован в виде ситуационной модели. На вход блока поступают два спрогнозированных вектора параметров и один текущий, на выходе блока формируется множество альтернатив принимаемых решений.

Анализ входных данных и устранение неполноты физических данных выполнялись методом многомерной регрессии.

Для формирования массива информативных параметров воспользовались построением регрессионной поверхности. Для этого все входные данные (рис. 6) преобразуются в трехмерный вид (рис. 7). Результатом предлагаемого метода является построение объемной регрессионной поверхности (рис. 8) и нахождение по ней недостающих или утерянных информативных параметров объекта.

Краткосрочное прогнозирование динамики параметров повреждений объекта осуществляется на основе ANFIS-подобной модели, при этом:

- для базы правил знания записываются в виде нечеткого правила

$$R^{(k)} : IF (x_1 \text{ 'это } A_1^k \text{ AND } x_2 \text{ это } A_2^k \text{ K AND } x_n \text{ это } A_n^k) \\ THEN (y \text{ это } B)$$

$$\mu_{A^k \rightarrow B^k}(x, y) = \mu_{A^k}(x) \cdot \mu_{B^k}(y) .$$

- для блока вывода функция принадлежности нечеткого множества B^k

$$\mu_{\bar{B}^k}(y) == \sup_{x_1, \dots, x_n \in X} \left\{ \mu_{B^k}(y) \cdot \prod_{i=1}^n \mu_{A_i}(x_i) \cdot \mu_{A_i^k}(x_i) \right\} .$$

- для блока формирования нечетких множеств

$$A'(x) = \begin{cases} 1, \text{если } x = \bar{x}, \\ 0, \text{если } x \neq \bar{x}. \end{cases}$$

$$\mu_{\bar{B}^k}(y) = \mu_{B^k}(y) \cdot \prod_{i=1}^n \mu_{A_i^k}(\bar{x}_i)$$

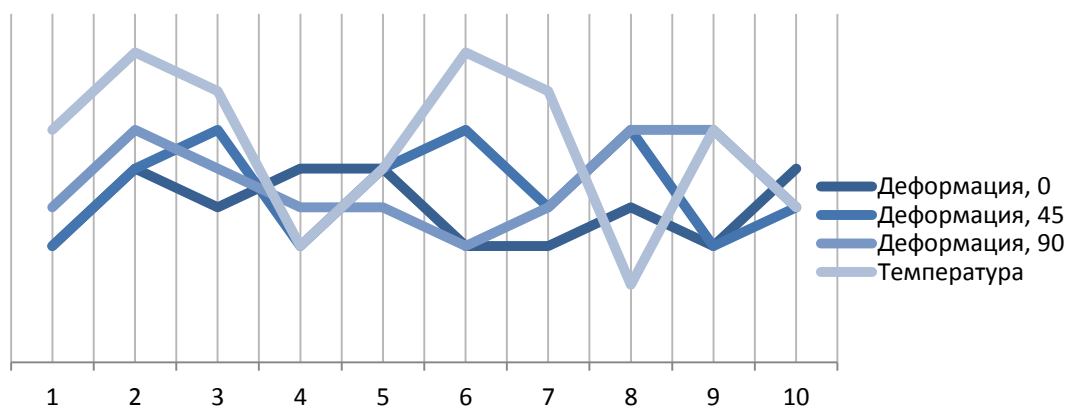


Рис. 6. Входные информативные параметры

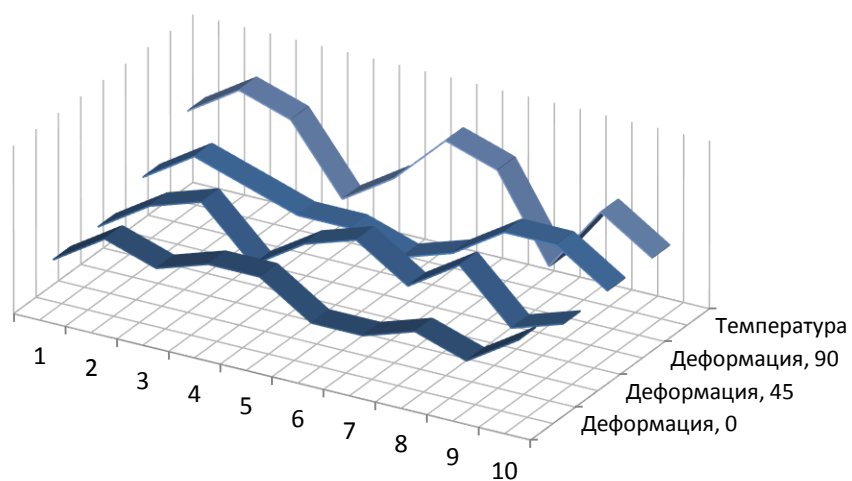


Рис. 7. Входные информативные параметры в объемном представлении

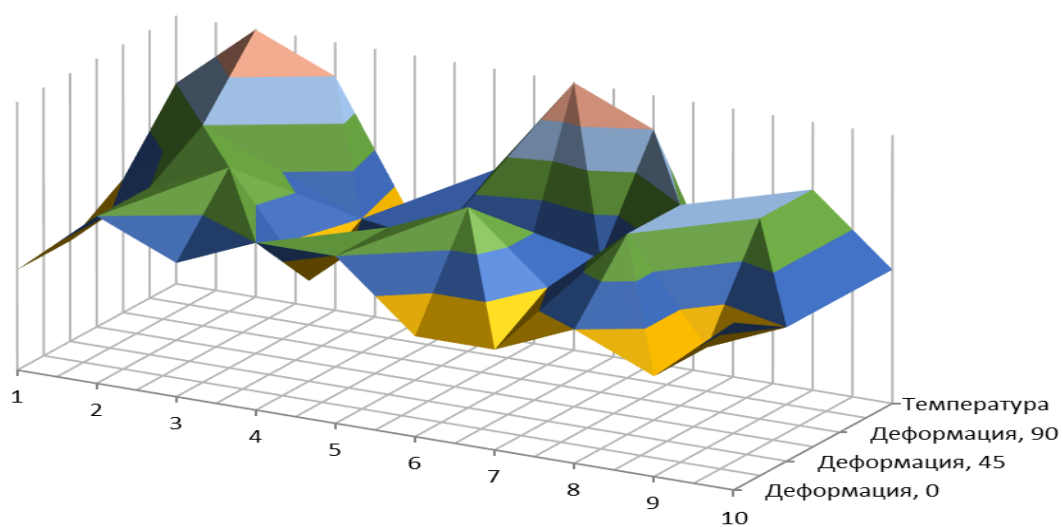


Рис. 8. Реализация регрессионной поверхности

- для блока формирования четкого решения ННС

$$y = \frac{\sum_{k=1}^N y^k \left(\prod_{i=1}^n \exp \left[- \left(\frac{x_i - x_i^k}{\sigma_i^k} \right)^2 \right] \right)}{\sum_{k=1}^N \left(\prod_{i=1}^n \exp \left[- \left(\frac{x_i - x_i^k}{\sigma_i^k} \right)^2 \right] \right)}$$

Структура нечеткой нейронной ANFIS-подобной сети, реализованной в данной работе, представлена на рис. 9.

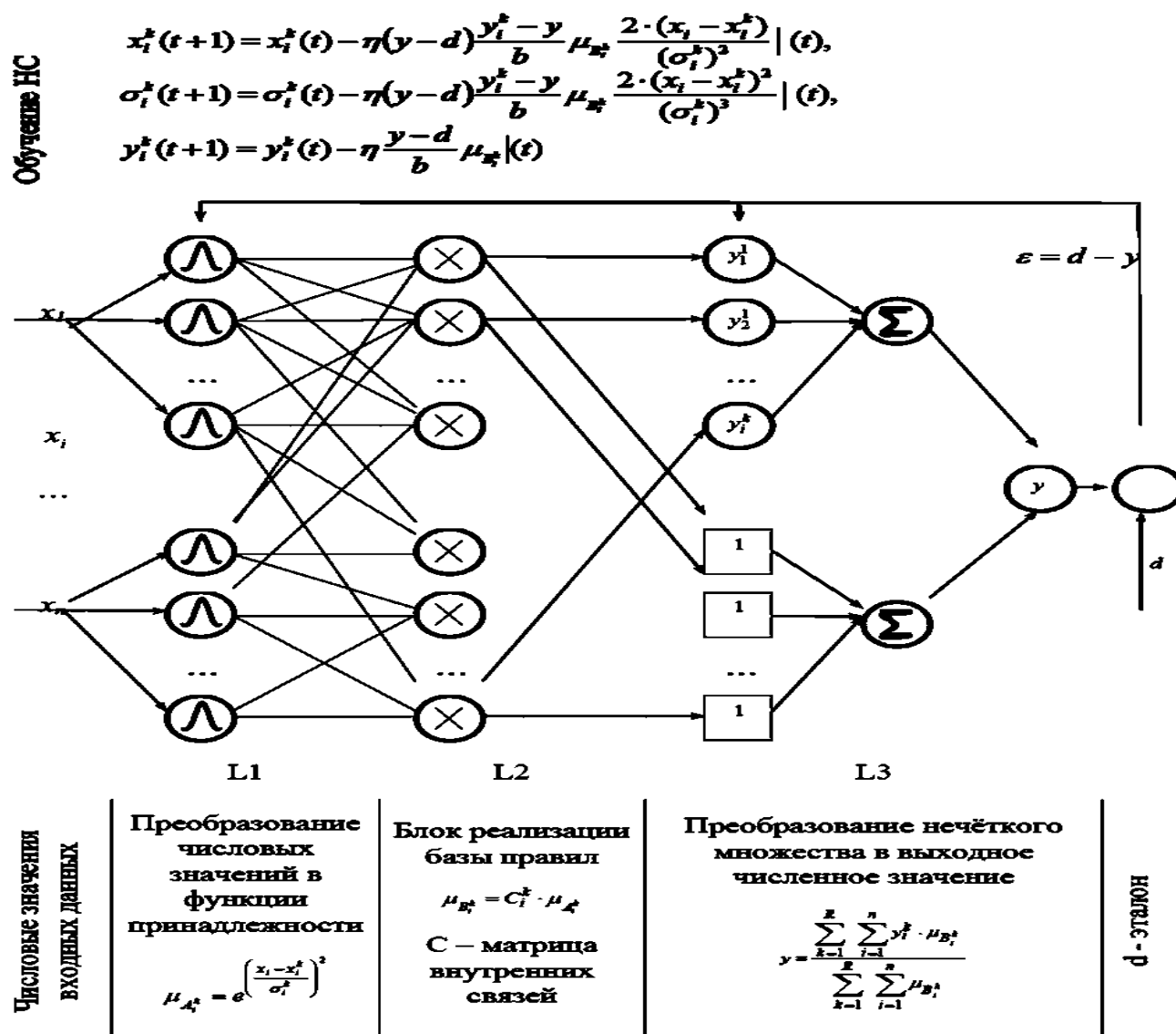


Рис. 9. Структура нечёткой нейронной ANFIS-подобной сети

Для реализации интеллектуальной системы принятия решений была разработана нечеткая ситуационная модель, включающая блок оценки состояний (фаззификация), блок принятия решений, блок формирования выходного воздействия (дефаззификация). Зависимости, определяющие способ модификации весов и параметров на основе алгоритма обратного распространения ошибки, представлены ниже:

$$x^k(t+1) = x^k(t) - \eta \frac{\partial e(t)}{\partial x_i^k(t)},$$

где $t = 0, 1, 2, \dots$ - обозначает номер итерации, $i = 1, \dots, n$, $k = 1, \dots, N$, $x^k(0)$ - начальное значение входного сигнала, а константа η интерпретируется как коэффициент (шаг), определяющий скорость обучения.

Алгоритм обучения для параметра x_i^k

$$x_i^k(t+1) = x_i^k(t) - \eta(y-d) \frac{y^k - y}{b} z^k \frac{2 \cdot (x_i - x_i^k)}{(\sigma_i^k)^2} \Big|_t$$

Аналогично записывается выражение и для y^k, σ_i^k . Причем физический смысл параметров x_i^k и σ_i^k - это, соответственно, центр и ширина гауссовой кривой.

В четвертой главе приведены результаты программной реализации системы многопараметрического неразрушающего контроля, диагностики и мониторинга с возможностью поддержки принятия решений в случае возникновения опасности повреждения оборудования. Укрупненная структура разработанного программного комплекса приведена на рис. 10. Функционально она включает в себя реализацию нескольких взаимосвязанных модулей, каждый из которых выполняет собственные задачи. Данное решение позволяет как и интегрировать данные модули в единую систему, так и обеспечить функционирование каждого элемента самостоятельно, в зависимости от решаемых задач.

В структуре программного комплекса выделяются четыре подсистемы:

- подсистема программной реализации непрерывного многопараметрического неразрушающего контроля состояния критических зон оборудования ЯЭУ. Данная подсистема наделена широким функционалом. Все данные о состоянии контролируемого узла поступают в модуль сбора и первичной обработки информации, где физическим информативным параметрам присваивается классификационный признак, позволяющий четко относить их к конкретному оборудованию, узлу. Далее модуль хранения и передачи данных производит в автоматическом режиме экспресс-обработку данных с возможностью оперативной визуализации текущей информации и дальнейшим занесением ее в базу данных

БД1. Расчетный модуль «Узор» является центральным ядром подсистемы. Модуль содержит программную реализацию трехмерной конечно - элементной модели, позволяющую в режиме реального времени оценивать кинетику развития эксплуатационных дефектов на основе анализа фактических параметров нагружения.

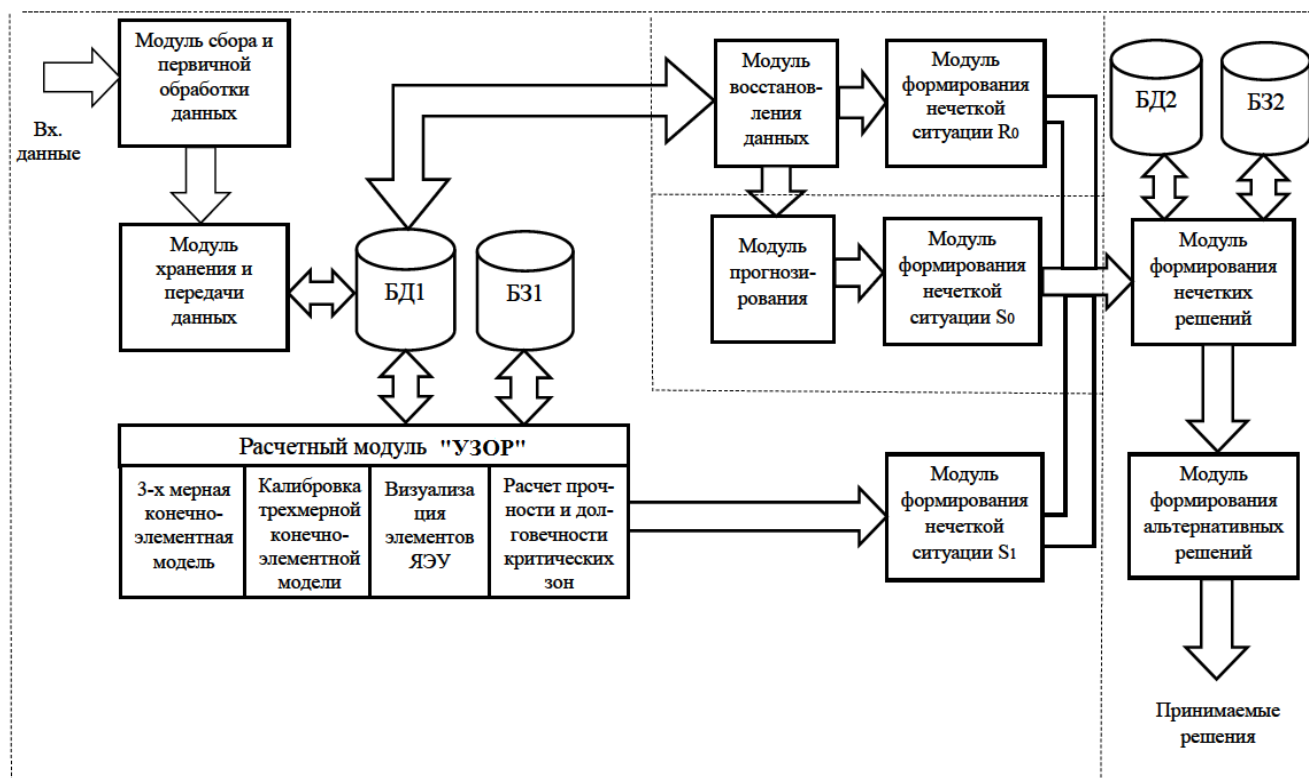


Рис. 10. Укрупненная структура программного комплекса

В подсистеме заложена возможность отладки и калибровки конечно-элементной модели на основе фактических значений контролируемых параметров (полей температур, деформаций, перемещений и т.д.).

Далее все события, фиксируемые системой контроля и мониторинга, сопоставляются с характеристиками эксплуатационных режимов. Это позволяет получить зависимость поведения несплошностей критических зон оборудования от технологических параметров и установить причинно-следственные связи, отвечающие за образование и рост дефектов. На основе этого выполняется расчетно-экспериментальное прогнозное обоснование прочности оборудования, что позволяет разработать компенсирующие мероприятия, направленные на снижение влияния основных повреждающих факторов и повышение долговечности объекта контроля.

Использование при формировании структуры программного комплекса принципов СПРИНТ-технологии – наличие локальных БД1 и БД3 позволяет использовать данный модуль отдельно в рамках реализации индивидуальных

СНМЭП;

- подсистема формирования множества информативных параметров. Основное назначение данного модуля - анализ входных данных и устранения проблем неполноты информации на основе реализации многомерных регрессионных моделей. В данном модуле обрабатывается поступающая на его вход матрица значений информативных параметров, имеющих корреляцию между собой. При этом оцениваются параметры регрессионной зависимости и ковариационная матрица случайных ошибок. Основой данного модуля является реализация алгоритма восстановления неполноты данных. В момент анализа параметров данный модуль фиксирует неполноту входного вектора и после получения регрессионной модели формирует дополнительное значение. Далее производится формирование регрессионной поверхности и восстановление недостающей информации;

- подсистема прогнозирования. Данный модуль реализует алгоритмы формирования прогнозных значений информативных параметров на основе ANFIS-подобной нечетко-нейронной сети. В качестве функции принадлежности используется параметризованная Гауссова кривая. Настройка параметров получается с помощью алгоритма обратного распространения ошибки. Знания в виде нечетких правил хранятся в базе правил. При формировании четкого решения веса связей интерпретируются как центры функций принадлежности нечетких множеств;

- подсистема принятия решений. На вход модуля принятия решений поступают три массива-ситуации, описывающие текущее и возможное прогнозное состояние исследуемого объекта. На выходе модуля есть множество альтернатив, предполагающих альтернативное развитие состояния объекта при разных входных ситуациях. Формально здесь реализуется алгоритм на основе ситуационной модели с тремя основными классическими составляющими: оценкой состояний (фазификация); принятием решений; формированием выходного воздействия (дефазификация). В основу функционирования модуля принятия решений нечеткой модели управления "ситуация-действие" положен принцип определения по системе продукций, необходимых при данной входной ситуации, управленческих решений. Набор продукционных правил хранится в БЗД, сформированной на основе экспертных оценок.

В качестве примера можно привести работу процесса принятия решения по исключению основных факторов, провоцирующих образование и развитие дефектов, в частности непроектных термомеханических воздействий на металл «карманов» ПГ вследствие «обратных» токов «холодной» продувочной воды. Эти управленческие решения были получены на основе рекомендаций системы принятия решения на основе ННС.

В качестве примера принятия решений приведены действия оперативного персонала в случае аварийной ситуации. Эти действия сформированы на базе

симптомно - ориентированных процедур, которые применяются, в случае, если оперативный персонал не смог идентифицировать исходное событие, послужившее причиной аварии, не смог определить, какую из событийных процедур следует применить для управления аварией, если произошло наложение исходных событий (например: течь первого контура и течь второго контура) и оперативный персонал не может определить приоритетность своих действий, а также применение событийной процедуры не приводит к предполагаемым результатам. В результате работы ПК на базе ННС получаем заключение правил (пошаговые алгоритмические действия для оперативного персонала по управлению аварией) (рис. 11).

Рис. 11. Пример процесса принятия решений

Таким образом, подход с использованием моделей нейропрогнозирования ANFIS-подобной нечеткой нейронной сети является универсальным для поддержки принятия решений по действиям оперативного персонала в случае аварийной ситуации. В случае развития дефекта в критической зоне оборудования в результате работы ПК на базе ННС получаем заключение правил для исключения развития дефектов в виде рекомендаций по изменению режима работы энергоблока (снижение нагрузки, либо отказ от суточного регулирования мощности по согласованию с системным оператором, либо останов для ремонта, либо продолжение работы энергоблока без ограничений).

В пятой главе приведены результаты практической апробации системы многопараметрического неразрушающего контроля в реальных условиях

эксплуатации потенциально опасных объектов ядерной энергетики на примере Нововоронежской АЭС.

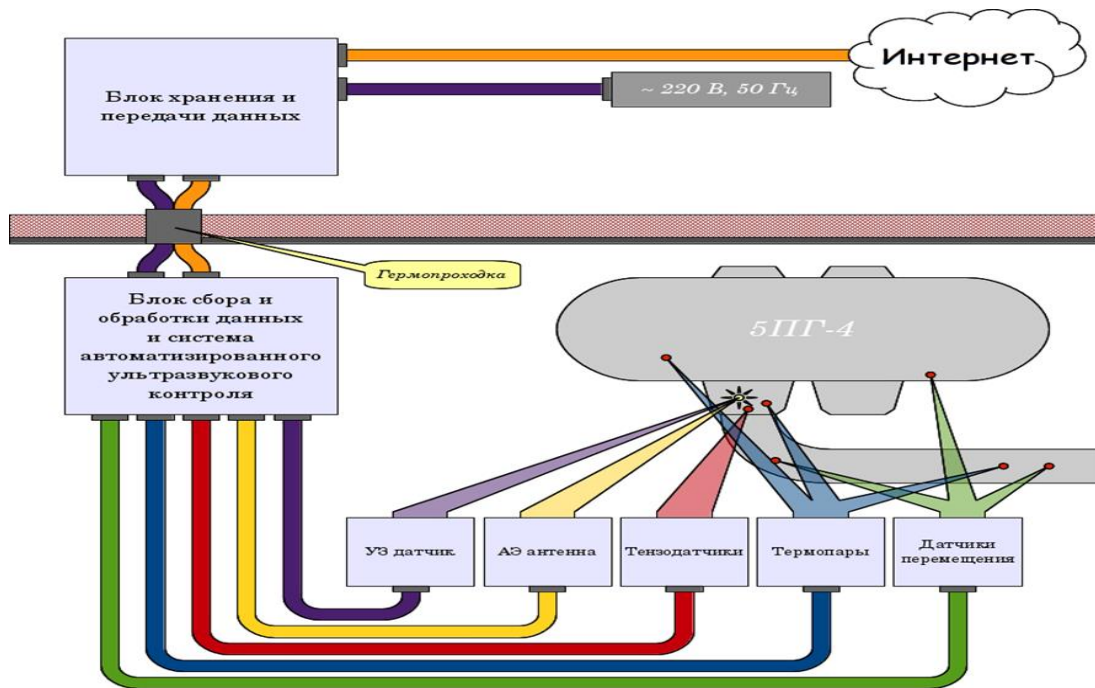


Рис. 12. Структурная схема системы непрерывного контроля живучести зоны СС №111 5ПГ-4

Предложен состав системы контроля термо-деформационной нагруженности (рис. 12), позволяющий реализовать следующий функционал:

- оценку динамики роста дефекта в различных эксплуатационных режимах (данную функцию выполняет блок ультразвукового (УЗ) непрерывного мониторинга с высокоскоростными каналами опроса УЗ преобразователя);
- определение момента образования и развития дефекта в зависимости от фактической эксплуатационной нагруженности на всех этапах эксплуатации блока: пуск-работа на мощности-останов (данную функцию выполняет блок акустико-эмиссионного (АЭ) контроля с высокоскоростными каналами опроса датчиков);
- сбор достоверных данных о фактической термо-силовой нагруженности зоны СС № 111 (данную функцию выполняют блоки контроля температур, деформаций, перемещений с низкоскоростными каналами опроса термодатчиков, тензорезисторов, датчиков перемещений).

Разработана архитектура компьютеризированной измерительной системы и предложена схема установки тензодатчиков и термодатчиков в зонах контроля.

Проведен анализ фактических температурных полей и деформаций в зоне СС № 111 5ПГ-4 с использованием экспериментальных данных, записанных СНМЭП в течение 28-й топливной кампании реакторной установки (РУ) с применением следующего подхода: для оценки влияния каждого из нагружающих параметров в

отдельности на деформационное состояние критической зоны выполнена обработка результатов контроля для промежутков времени, в которых изменялся только один параметр при стабильном уровне остальных параметров. В таблице приведены данные тензометрирования по наиболее показательным тензорезисторам, установленным на наружной поверхности сварного шва по центру. Значения деформаций, указанные в таблице, соответствуют моменту времени, когда относительное изменение рассматриваемого параметра нагружения было максимальным.

Сравнительный анализ результатов натурного тензометрирования в период проведения предпусковых операций

№ зоны	Зона А (600 мм)	Зона Г (1610 мм)	Зона Д (1785 мм)		Зона Е (2680 мм)	Зона И (3700 мм)	
№ датчика	206 (ос.)	203 (ос.)	209 (ос.)	202 (кол.)	214 (кол.)	222 (ос.)	221 (кол.)
Дата, изменение параметров	Деформация, $0,5 \cdot 10^{-5}$						
07.08.2011 г. $\Delta P_1=22,5$ МПа $P_2, t \sim \text{const.}$	-5	-14	-17	15	–	-1	12
18.08.2011 г. $\Delta P_1=12,0$ МПа $P_2, t \sim \text{const.}$	–	-6,5	-8	6,5	4	-0,5	5
07.09.2011 г. $\Delta P_1=14,0$ МПа $P_2, t \sim \text{const.}$	-3	-8	-9	8	4	-0,5	6
24.08.2011 г. $\Delta P_2=8,23$ МПа $P_1, t \sim \text{const.}$	-16	3	0	-20	8,5	-24	3
30.08.2011 г. $\Delta P_2=7,94$ МПа $P_1, t \sim \text{const.}$	-16	4	1	-19	7,5	-22	2
08.09.2011 г. $\Delta P_2=7,84$ МПа $\Delta P_1=7,35$ МПа $t \sim \text{const.}$	-16	-2	-5	-15	11,5	-22	6

Существенно, что в рассматриваемый промежуток времени тензорезисторами, установленными снаружи на поверхности сварного шва, зафиксирован высокий уровень деформаций во всех зонах контроля: в осевом направлении имеют место значительные сжимающие деформации, в кольцевом направлении – значительные растягивающие деформации (рис. 13, 14).

По итогам проведенного анализа можно сделать предварительный вывод о том, что в переходных режимах работы РУ (разогрев, расхолаживание) в зоне СС111 имеют место периодические термоудары различной интенсивности, что при

больших толщинах обечаек и в условиях стесненности деформаций может явиться одной из основных причин образования и развития дефектов.



Рис. 13. Осевые сжимающие деформации в зоне СС №111 5ПГ-4 при разогреве РУ до «горячего» состояния



Рис. 14. Кольцевые растягивающие деформации в зоне СС №111 5ПГ-4 при разогреве РУ до «горячего» состояния

В рамках работ по непрерывному контролю эксплуатационной нагруженности и повреждаемости зоны СС №111 5ПГ-4 контроль перемещений элементов выполнялся для следующих элементов: «горячей» опоры 5ПГ-4 (2 датчика), «холодной» опоры 5ПГ-4 (2 датчика), «горячей» нитки петли № 4 ГЦТ (4 датчика).

Анализ результатов контроля перемещений показывает, что изменение перемещений в контролируемых зонах пропорционально изменению температур в 1 и 2 контурах. При этом форма кривых, построенных по результатам непрерывного

мониторинга перемещений, полностью повторяет форму кривых температур по показаниям штатных датчиков РУ.

С целью максимально корректного расчета напряженно-деформированного состояния в зоне СС № 111 была разработана конечноэлементная и суперэлементная модель циркуляционной петли № 4 энергоблока № 5 НВАЭС, включающая в себя модель фактического обнаруженного дефекта, элементы циркуляционной петли первого контура (ПГ, «горячая» и «холодная» нитки ГЦТ, фрагмент корпуса реактора, ГЦН), а также основные присоединительные трубопроводы 5ПГ-4 (главный паропровод, трубопровод питательной воды).

Примеры визуализации элементов РУ и трещиноподобного дефекта приведены на рис. 15.

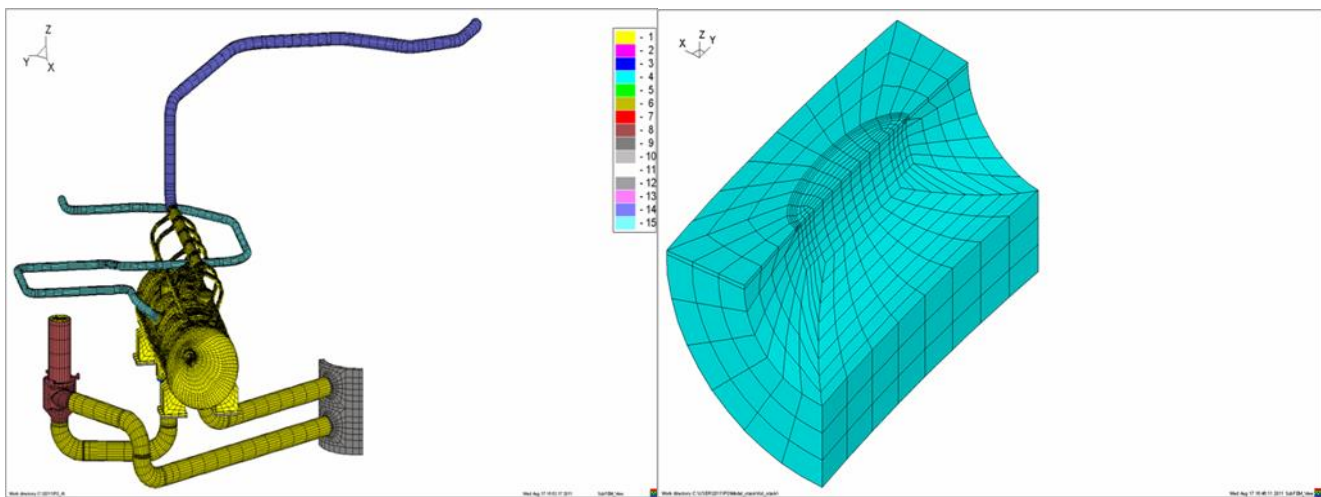


Рис. 15. Модель циркуляционной петли ПГ-4 пятого блока НВАЭС и визуализация фрагмента модели корпуса коллектора, включающего эллиптический трещиноподобный дефект

Для разработанной КЭ модели СС №111 5ПГ-4, которая прошла отладку и калибровку с использованием экспериментальных данных, на начальном этапе работы проведены расчетные оценки влияния основных параметров нагружения по отдельности на напряженно-деформированное состояние в зоне СС № 111:

1. Давление $P_1 = 1$ МПа в первом контуре (единичное давление).
2. Давление $P_2 = 1$ МПа во втором контуре (единичное давление).
3. Изменение температуры среды в первом и втором контурах на 100°C .
4. Перемещение горячего коллектора на 1 мм в направлении оси III.
5. Перемещение горячего коллектора на 1 мм в направлении оси II.
6. Нестационарные поля температур в переходных режимах работы РУ.

При моделировании нестационарных температурных полей было принято к рассмотрению три варианта прохождения режимов, описанных ниже.

Вариант 1: снижение температуры среды в кармане горячего коллектора от

исходного температурного состояния (НУЭ) на 1000 °С по короткой стороне патрубка и на 500 °С по длинной стороне патрубка за 30 минут; выдержка при сниженной температуре 1,5 часа; нагрев среды до исходных величин за 30 минут.

Вариант 2: снижение температуры среды в кармане горячего коллектора от исходного температурного состояния (НУЭ) на 1000 °С по короткой стороне патрубка и на 500 °С по длинной стороне патрубка за 5 минут; выдержка при сниженной температуре 1,5 часа; нагрев среды до исходных величин за 5 минут.

Вариант 3: снижение температуры среды в кармане горячего коллектора от исходного температурного состояния (НУЭ) на 500 °С по короткой стороне патрубка и на 300 °С по длинной стороне патрубка за 5 минут; выдержка при сниженной температуре 1,5 часа; нагрев среды до исходных величин за 5 минут.

Для каждого варианта решалась нестационарная температурная задача с изменяющимися во времени граничными условиями (температура среды в кармане коллектора меняется по заданному закону). Результаты решения (температурные поля) записывались в память компьютера через заданные промежутки времени (от 40 до 80 моментов времени). Далее для каждого полученного распределения температур проводился расчет напряженно-деформированного состояния в зоне СС №111-1. Уровень напряжений здесь зависит от амплитуды изменения температуры и скорости ее изменения. Чем выше амплитуда и скорость, тем выше напряжения.

С целью оценки динамики возможного роста выявленной несплошности на этапе пуска, эксплуатации и останова энергоблока № 5 НВАЭС в рамках СНСЭП использовалась система ультразвукового on-line контроля и мониторинга. В процессе контроля записывались все собираемые данные – так называемые А-сканы эхо-сигналов в каждом из 3-х измерительных стробов, установленных на дефектоскопе УМД-8, и определялись максимальные амплитудные значения зарегистрированных величин эхо-сигналов. А-скан представляет собой изображение эхо-сигналов, отраженных от дефектов в сварных соединениях или конструктивных элементов контролируемой зоны. При этом временной промежуток от зондирующего импульса до отраженного эхо-импульса от дефекта через скорость распространения ультразвуковых колебаний определяет расстояние УЗ преобразователь – дефект, а амплитуда эхо-сигнала связана с величиной дефекта.

Вид двух А-сканов, записанных с промежутком времени 30 мин., в программе обработки данных показан на рис. 16. Из рисунка видно отсутствие пиков и хорошее совпадение их формы.

После цифровой обработки эхо-сигналов и амплитудной селекции получали эталонное измерение А-скана, записанного на УМД-8 в каждом из 3-х измерительных стробов через акустический волновод длиной 600 мм, (см. рис. 17). При обработке результатов данных УЗ контроля учитываются значения температуры в месте установки УЗ датчика и в зоне дефектности СС №111 в течение всех пусковых операций и работы энергоблока на мощности.

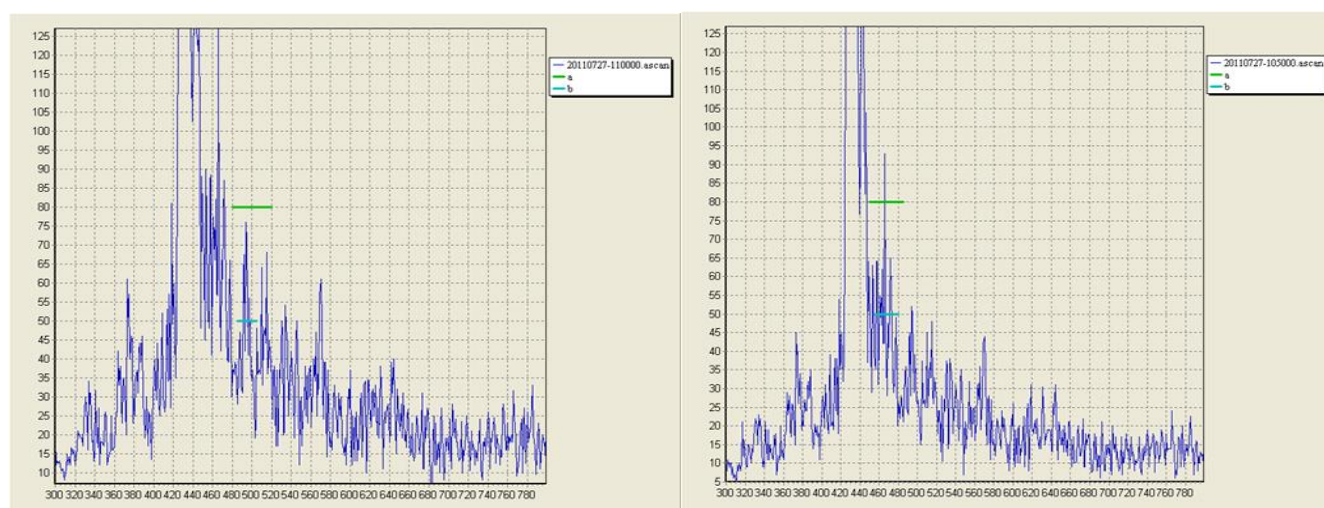


Рис. 16. Вид двух отфильтрованных А-сканов с изображением эхо-сигналов в измерительных stroбах (зонах контроля)

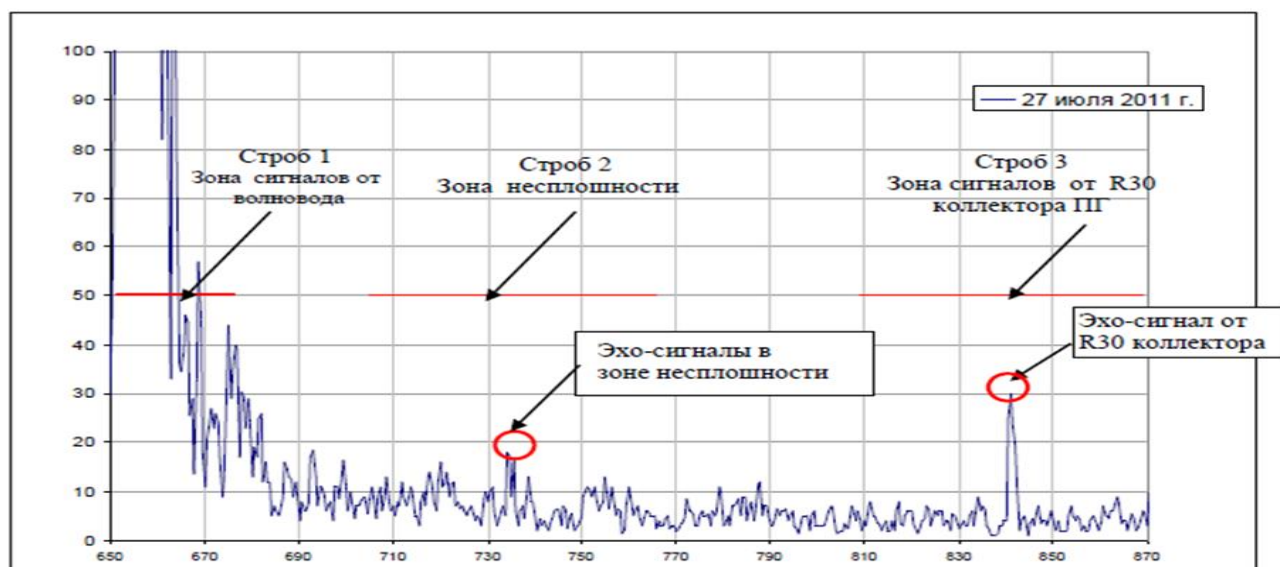


Рис. 17. Эталонное измерение А-скана с изображением эхо-сигналов в каждом из 3-х измерительных stroбов (усиление 61 дБ)

Для определения моментов образования или подрастания трещиноподобного дефекта, выявленного в зоне СС № 111, в зависимости от фактической термодинамической нагруженности при различных режимах эксплуатации РУ (пуск-работа на мощности-останов) в рамках СНМЭП была смонтирована и введена в работу система акустико-эмиссионного (АЭ) контроля. К основным задачам АЭ диагностики относили не только регистрацию сигналов, генерируемых скачкообразными изменениями в структуре материала контролируемого объекта при приложении нагрузки, но и определение координат АЭ источников. Такая возможность АЭ метода контроля не зависит от того, стоит ли датчик

непосредственно над источником АЭ или нет. Главное, чтобы датчики стояли в области распространения АЭ сигналов интересующей нас области объекта. Чем плотнее сеть постановки датчиков, тем достоверней результат по вычислению координат АЭ источника.

Разработанная система контроля и диагностики была применена и для мониторинга стратификации дыхательного трубопровода компенсатора давления с целью определения фактического уровня термической стратификации (ТС) теплоносителя с точки зрения особенностей тепло-гидравлических и физических характеристик стратификационного потока и оценки влияния ТС на повреждаемость металла.

Система непрерывно отслеживала изменения температуры в четырех сечениях трубопровода в течение года и записывала показания с выбираемым интервалом от 1 до 5 минут. В каждом контрольном сечении располагалось пять датчиков по периметру сечения по внешней поверхности трубопровода. С помощью программы обработки данных были определены моменты времени изменения температуры более чем на 10 °С при ТС в контрольных сечениях. За одну топливную кампанию было сделано более 5 миллионов контрольных измерений и выявлено 328 таких моментов. Эти данные потом использовались для расчета НДС. Анализ рассчитанного НДС показал, что максимальные термосиловые нагрузки наблюдаются в зоне СС №7, где происходит постоянное изменение температуры и ярко выражен эффект стратификации. Разработаны компенсирующие мероприятия, связанные с изменением эксплуатационных процедур для снижения температурных напряжений от стратификации.

Следующей задачей, при решении которой использовалась методика расчетно-экспериментального контроля и мониторинга, была задача управления ресурсными характеристиками защитной оболочки (ЗО) (контаймента) 5-го блока НВ АЭС в период продленного срока эксплуатации. Критерий прочности защитной оболочки - значения напряжения и деформации при эксплуатации меньше предельных значений напряжений и деформаций, которые может воспринять контаймент. В качестве контрольных датчиков использовались датчики температуры, деформации и перемещения. Место установки датчиков было продиктовано, так же, как и при контроле сварного соединения №111 ПГ, зоной максимальной эксплуатационной дефектности. Датчики были размещены непосредственно в зоне найденной протяженной поверхностной трещины (рис. 18).

Исследования проводились непрерывно в течение года с целью оценки влияния суточных, сезонных изменений температуры и давления. Таким образом был обеспечен непрерывный контроль за состоянием ЗО в процессе эксплуатации энергоблока №5, мониторинг степени раскрытия обнаруженной трещины. Подготовлены рекомендации по схеме замены канатов преднапряжения и усилий их натяжения.

Расчетно-экспериментальный анализ мониторируемых событий в различных

режимах работы РУ позволил на основе прогноза о развитии дефектных кластеров принять решение об эксплуатации 5 энергоблока в режиме продленного срока службы при условии проведения компенсирующих мероприятий.



Рис. 18. Общий вид системы контроля и диагностики состояния контейнмента

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ДИССЕРТАЦИИ

1. Проведен анализ существующих методов и систем неразрушающего контроля и диагностики ядерно-энергетических установок (ЯЭУ) современных АЭС.
2. Проведены анализ физических особенностей повреждаемости критических элементов оборудования энергоблока и разработка алгоритма численного расчета параметров механического разрушения для пространственных трещин.
3. Разработана методика идентификации потенциально опасных явлений в критических элементах оборудования энергоблока с учетом трехмерного напряженно-деформированного состояния диагностируемого узла.
4. Разработана методология реализации процесса многопараметрического расчетно-экспериментального контроля и мониторинга критических зон оборудования.
5. Разработана методика определения остаточного ресурса оборудования на основе концепции непрерывного многопараметрического контроля и мониторинга для задач управления сроком службы АЭС.
6. Разработана концептуальная модель безопасной эксплуатации объектов ядерной энергетики на основе расчетных проектных нагрузок, нарушениях

нормальных условий эксплуатации и прогноза накапливаемой повреждаемости в течение срока службы объекта контроля.

7. Разработана система поддержки принятия решений оператором ядерного блока, интегрированная с системой непрерывного контроля и мониторинга эксплуатационной повреждаемости оборудования АЭС.

8. Разработана методика нейропрогнозирования динамики физических параметров диагностируемого объекта на основе ANFIS-подобных нейросетей.

9. Разработана методика процесса принятия управленческих решений на основе формального анализа текущих и прогнозных значений параметров состояния оборудования в условиях непрерывного контроля критических зон оборудования ЯЭУ.

10. Разработан программный комплекс системы многопараметрического непрерывного контроля и диагностики эксплуатационной повреждаемости конструктивных элементов оборудования и поддержки принятия решений для безопасного функционирования АЭС.

11. Проведена практическая апробация системы многопараметрического неразрушающего контроля и диагностики в реальных условиях эксплуатации потенциально опасного оборудования НВ АЭС.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ДИССЕРТАЦИИ ОПУБЛИКОВАНЫ В СЛЕДУЮЩИХ РАБОТАХ

Публикации в изданиях, рекомендованных ВАК РФ и индексируемых в международных базах Scopus и Web of Science

1. Асмолов В.Г. Повторное продление срока эксплуатации энергоблока №4 Нововоронежской АЭС/ В.Г. Асмолов, В.П. Поваров, С.Л. Витковский и др. // Ядерная и радиационная безопасность. Спецвыпуск - 2019. - С. 3-18.

2. Поваров В.П. Особенности использования многоуровневой конфигурации специализированной информационной системы в задачах реализации принципа разнообразия систем безопасности 4-го блока Нововоронежской АЭС / В.П. Поваров, Д.В. Терехов, А.Д. Данилов // Ядерная и радиационная безопасность. Спецвыпуск - 2019. – С. 41-45.

3. Гусев И.Н. О проблеме интеллектуальной поддержки операторов для современных автоматизированных систем управления технологическим процессом энергоблоков с ВВЭР / И.Н. Гусев, В.П. Поваров, М.Ю. Тучков и др. // Ядерная и радиационная безопасность. Спецвыпуск - 2019. - С. 46-54.

4. Поваров В.П. Некоторые аспекты повторного продления срока эксплуатации реакторной установки с ВВЭР-440 на примере энергоблока №4 Нововоронежской АЭС / В.П. Поваров, А.И. Федоров, С.Л. Витковский // Известия высших учебных заведений. Ядерная энергетика.- 2019. - № 2. - С. 91-104.

5. Аверьянова С.П. Исследование ксеноновых переходных процессов в ВВЭР-1200 на Нововоронежской АЭС / С.П. Аверьянова, Н.С. Вохмянина, Д.А. Злобин, П.Е. Филимонов, В.П. Поваров // Атомная энергия.- 2018. - Т. 124. - № 4. - С. 183-187.

6. Danilov A. Intellectual decision-making system in the context of potentially dangerous nuclear power facilities /A. Danilov, V. Povarov, V. Burkovsky, S. Podvalny and K. Gusev// MATEC Web of Conferences. Volume 161 (2018).

7. Povarov, V. Data support system for controlling decentralised nuclear power industry facilities through uninterruptible condition monitoring / V. Povarov, A. Danilov, V. Burkovsky and K. Gusev// MATEC Web of Conferences. Volume 161 (2018).
8. Гусев И.Н. Использование результатов пусконаладочных работ для создания, настройки и валидации системы интеллектуальной поддержки оператора на блоке № 1 Нововоронежской АЭС-2 / И.Н. Гусев, Б.Л. Соловьев, В.П. Поваров и др. // Известия высших учебных заведений. Ядерная энергетика. - 2017. - № 3. - С. 45-54.
9. Коробкин В.В. Информационно-управляющая система машины перегрузочной нового поколения / В.В. Коробкин, В.П. Поваров // Известия высших учебных заведений. Ядерная энергетика. - 2017. - № 3. - С. 98-107.
10. Асмолов В.Г. Головной блок нового поколения – особенности проекта ВВЭР 1200/ В.Г. Асмолов, И.Н. Гусев, В.Р. Казанский, В.П. Поваров, Д.Б. Стацура // Известия высших учебных заведений. Ядерная энергетика. - 2017. - № 3. - С. 5-21.
11. Андропов Е.В. Повышение надежности эксплуатации АЭС на основе реализации принципа разнообразия / Е.В. Андропов, И.Р. Коган, В.П. Поваров и др.// Известия высших учебных заведений. Ядерная энергетика. - 2017.- № 3.- С. 33-44.
12. Коробкин В.В. Информационно-управляющая система машины перегрузочной нового поколения / В.В. Коробкин, В.П. Поваров // Известия высших учебных заведений. Ядерная энергетика. - 2017. - № 3. - С. 98-107.
13. Поваров В.П. Расчетно-экспериментальная оценка влияния термической стратификации на эксплуатационную нагруженность дыхательного трубопровода энергоблока № 5 Нововоронежской АЭС / В.П. Поваров, О.В. Уразов, М.Б. Бакиров, В.И. Левчук // Известия высших учебных заведений. Ядерная энергетика. - 2017. - № 1.- С. 5-16.
14. Korobkin V.V New generation refueling machine information and control system / V.V. Korobkin, V.P. Povarov // Nuclear Energy and Technology. - 2017. - V. 3. - № 4. - P.302.
15. Povarov V.P. Analysis of the reasons for damage in the welded assembly joining the hot collector of first-loop coolant to the du 1200 tube of the steam generators in no. 5 unit of the Novovoronezh NPP / V.P. Povarov, M.B. Bakirov // Atomic Energy. - 2016. - T.119.- № 3.- С. 153-162.
16. Поваров В.П. Оценка влияния термической стратификации на остаточный ресурс дыхательного трубопровода компенсатора давления 5-го энергоблока Нововоронежской АЭС / В.П. Поваров // Атомная энергия . - 2016. - Т. 120. - № 1. - С. 17-23.
17. Нетяга Н.Н. Оценка рисков повреждения узла приварки коллектора к патрубку ПГ АЭС с ВВЭР / Н.Н. Нетяга, С.П. Саакян, В.П. Поваров // Известия высших учебных заведений. Ядерная энергетика. - 2016. - № 4.- С. 31-43.
18. Иванов Е.А. Контроль состояния барьеров безопасности атомных станций / Е.А. Иванов, И.В. Пырков, В.П. Поваров и др. // Атомная энергия . - 2015. - Т. 118. - № 2. - С. 63-67.
19. Поваров В.П. Анализ поврежденных сварных швов №111 ПГВ 1000 и предложения по их устранению / В.П. Поваров // Известия высших учебных заведений. Ядерная энергетика. - 2015. - № 1. - С. 28-38.
20. Томаров Г.В. Разработка и применение информационно-аналитического комплекса по проблеме эрозии-коррозии элементов трубопроводов II контура энергоблоков Нововоронежской АЭС с РУ ВВЭР-440 / Г.В. Томаров, В.П. Поваров, А.А. Шипков и др. // Теплоэнергетика . - 2015.- № 2. - С.63.
21. Поваров В.П. Анализ причин повреждения узла приварки горячего коллектора теплоносителя первого контура к патрубки ду 1200 парогенераторов 5-го блока Нововоронежской АЭС / В.П. Поваров, М.Б. Бакиров //Атомная энергия. - 2015. - Т. 119. - № 3. - С. 126-134.
22. Томаров В.Г. Оптимизация планирования эксплуатационного контроля локальной эрозии-коррозии элементов трубопроводов II контура энергоблоков Нововоронежской АЭС с РУ

ВВЭР-440 / Г.В. Томаров, В.П. Поваров, А.А. Шипков и др. // Теплоэнергетика. - 2015. - № 3. - С. 75.

23. Бакиров М. Б. Разработка и внедрение технологии оперативной диагностики повреждения ответственного оборудования как процедуры управления ресурсом АЭС / М.Б. Бакиров, В.П. Поваров // Вестник ВГУ. Серия: Физика. Математика. – 2015. - №1. – С. 5-17.

24. Bakirov M.B. Development of a technology for continuous acoustic emission monitoring of in-service damageability of metal in safety-related NPP equipment / M.B. Bakirov, V.P. Povarov, A.F. Gromov, V.I. Levchuk // Nuclear Energy and Technology. - 2015. - Т. 1. - № 1 (1). - С. 32-36.

25. Povarov V.P. Analysis of damaged welds no. 111 in the PGV-1000 steam generator and damage repair proposals / V.P. Povarov // Nuclear Energy and Technology. - 2015. - Т. 1. - № 1 (1). - С. 68-73.

26. Бакиров М.Б. Внедрение технологии экспертного непрерывного акустико-эмиссионного мониторинга для оценки эксплуатационной повреждаемости металла ответственного оборудования атомных станций / М.Б. Бакиров, В.П. Поваров, Д.А. Николаев, А.Ф. Громов // Известия высших учебных заведений. Ядерная энергетика. - 2014. - № 4. - С. 5-10.

27. Бакиров М.Б. Разработка технологии непрерывного акустико-эмиссионного мониторинга эксплуатационной повреждаемости металла ответственного оборудования атомных станций парогенератора / М.Б. Бакиров, В.П. Поваров, А.Ф. Громов, В.И. Левчук // Известия высших учебных заведений. Ядерная энергетика. - 2014. - № 3. - С. 15-24.

28. Казаков В.А. Повышение динамической устойчивости энергоблоков АЭС с реактором ВВЭР-1000 / В.А. Казаков, В.В. Жуденков, В.П. Поваров, И.Л. Витковский // Теплоэнергетика. - 2014. - № 1. – С. 50.

29. Асмолов В.Г. Концепция продления срока эксплуатации энергоблоков с ВВЭР-440 Нововоронежской АЭС / В.Г. Асмолов, В.П. Поваров, С.Л. Витковский и др. // Теплоэнергетика. - 2014. - № 2. - С. 16.

30. Поваров В.П. Развитие и применение современных методов контроля герметичности и оценки состояния топлива на Нововоронежской АЭС / В.П. Поваров, А.Б. Терещенко // Теплоэнергетика. - 2014. - № 2. - С. 54.

31. Бакиров М.Б. Анализ причин появления непроектных термосиловых воздействий в зоне сварного соединения № 111-1 ПГВ-1000М и рекомендации по их исключению / Бакиров М.Б., Левчук В.И., Поваров В.П., Громов А.Ф. // Теплоэнергетика. - 2014. - № 8. - С. 3.

32. Бакиров М.Б. Разработка технологии непрерывного акустико-эмиссионного мониторинга эксплуатационной повреждаемости металла ответственного оборудования атомных станций парогенератора / М.Б. Бакиров, В.П. Поваров, А.Ф. Громов, В.И. Левчук // Известия высших учебных заведений. Ядерная энергетика. - 2014. - № 3. - С. 15-24.

33. Терешонок В.А. Предупреждение и подавление аксиальных ксеноновых колебаний в активной зоне ВВЭР-1000 / В.А. Терешонок, В.С. Степанов, В.П. Поваров и др. // Теплоэнергетика. - 2003. - № 5. - С. 11-15.

34. Терешонок В.А. Разработка и опыт эксплуатации специализированного измерительного комплекса при пуске энергоблока № 1 Ростовской АЭС / В.А. Терешонок, В.А. Литицкий, Е.И. Шалимов, В.П. Поваров, О.В. Лебедев // Теплоэнергетика. - 2003. - № 5. - С. 19-21.

35. Tereshonok V.A. The effect of the position of the ionization chambers relative to the individual control elements of a vver-1000 reactor on the readings of the reactivity meters / V.A. Tereshonok, V.P. Povarov // Thermal Engineering. - 2003. -Т. 50. - № 5. - P. 372-375.

36. Tereshonok V.A. Investigation of the behavior of a VVER-1000 reactor installation in a transient regime caused by a small power reduction / V.A. Tereshonok, V.S. Stepanov, V.P. Povarov, O.V. Lebedev // Atomic Energy. - 2002. - Т. 93. - № 4. - С. 853-854.

37. Tereshonok V.A. Studying the wwer-1000 behavior during transient conditioned by a small power decrease / V.A. Tereshonok, V.S. Stepanov, V.P. Povarov, O.V. Lebedev // Атомная энергия. - 2002. - Т. 93. - № 4. - С. 319-320

38. Tereshonok V.A. Xenon oscillations in the wwer-1000 reactor core / V.A. Tereshonok, V.S. Stepanov, V.P. Povarov // Атомная энергия. - 2002. - Т. 93. - № 4. - С. 247-253.

Свидетельства о регистрации патентов на изобретения и программы

39. Патент № 2574578 Российская Федерация. Система многопараметрического мониторинга эксплуатационной повреждаемости оборудования атомной станции / Бакиров М.Б., Поваров В.П. : заявитель и патентообладатель Бакиров Мурат Баязитович; заявл. 12.02.2014; опубл. 10.02.2016.

40. Патент № 2662655 Российская Федерация. Манипулятор для проведения ремонтных работ в коллекторе парогенератора ядерного реактора типа ВВЭР / Волков Л.П., Леонов А.Н., Пантеева Г.В., Поваров В.П. и др.: заявитель и патентообладатель ООО НПО «Альфа-Диагностика»; завл. 04.10.2017; опубл. 26.07.2018.

41. Патент № 2530538 Российская Федерация. Способ временного хранения радиоактивных отходов / Поваров В.П., Щукин А.П., Наливайко Е.М. и др.: заявитель и патентообладатель ОАО «Российский концерн по производству электрической и тепловой энергии на атомных станциях»; заявл. 08.06.2012; опубл. 14.08.2014.

42. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2018619114 от 31.08.2018 «Программный комплекс прогнозирования информативных параметров в задачах управления процессами функционирования АЭС на основе ANFIS-подобной нечетко-нейронной сети» / В.П. Поваров, В.Л. Бурковский, А.Д. Данилов, К.Ю. Гусев, В.М. Мугатина.

43. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2018619113 от 31.08.2018 «Программный комплекс принятия решений в задачах управления процессами функционирования АЭС на основе ситуационной модели» / В.П. Поваров, В.Л. Бурковский, А.Д. Данилов, К.Ю. Гусев, В.М. Мугатина.

44. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2018662936 от 17.10.2018 «Программный комплекс восстановления данных методом многомерной регрессии» / В.П. Поваров, В.Л. Бурковский, А.Д. Данилов, К.Ю. Гусев, В.М. Мугатина.

Монографии

45. Поваров В.П. Автоматизированная система многопараметрического мониторинга параметров состояния энергетических установок АЭС / В.П. Поваров, М.Б. Бакиров, А.Д. Данилов. Воронеж: Научная книга, 2017.- 245 с.

Статьи и материалы конференций

46. Поваров В.П. Программная реализация интеллектуальной системы принятия решений при управлении объектами ядерной энергетики / В.П. Поваров// Моделирование, оптимизация и информационные технологии. Научный журнал.- 2019. - Т. 7. - №1.- url: <http://moit.vivt.ru/>.

47. Поваров В.П. Концептуальный подход к разработке автоматизированной диагностической сети в системах управления ядерными блоками / В.П. Поваров // Системы управления и информационные технологии. - 2019. - № 1 (75). – С. 59-63.

48. Поваров В.П. Принципы разработки систем принятия решений в задачах управления ядерными блоками / В.П. Поваров // Вестник ВГТУ. -2018. - Т. 14. - № 2. - С. 87-91.

49. Поваров В.П. Обобщенная структура системы принятия решений в условиях потенциально опасных объектов атомной энергетики / В.П. Поваров // Вестник ВГТУ. -2018. - Т. 14. - № 2. - С. 51-56.

50. Поваров В.П. Алгоритмы принятия решений в задачах управления сроком службы объектов ядерной энергетики / В.П. Поваров, М.Б. Бакиров, А.Д. Данилов // Вестник ВГТУ. - 2018. - Т. 14. - № 1.- С. 49-58.

51. Поваров В.П. Обработка данных в системе непрерывного мониторинга эксплуатационной повреждаемости критических элементов энергетических установок / В.П. Поваров, М.Б. Бакиров, А.Д. Данилов // Вестник ВГТУ. - 2018. - Т. 14. - № 1. - С. 64-72.
52. Поваров В.П. Интеграция систем принятия решений в структуру верхнего уровня управления АЭС / В.П. Поваров, Д.В. Терехов, А.Д. Данилов // Альтернативная и интеллектуальная энергетика. Материалы Международной научно-практической конференции, 2018. - С. 54-60.
53. Поваров В.П. Программно-технический комплекс непрерывного мониторинга эксплуатационной повреждаемости оборудования ядерных энергетических установок / В.П. Поваров, М.Б. Бакиров, А.Д. Данилов // Вестник ВГТУ. - 2017. - Т. 13. - № 6. - С. 58-63.
54. Поваров В.П. Статистический анализ данных о повреждениях узла приварки коллектора к патрубку парогенератора АЭС с ВВЭР / В.П. Поваров, С.П. Саакян, В.А. Чепурко // Вестник кибернетики. - 2017. - № 2 (26). - С. 24-31.
55. Поваров В.П. Интеллектуальная система непрерывного мониторинга эксплуатационной повреждаемости критических элементов ядерных установок // В.П. Поваров, М.Б. Бакиров, А.Д. Данилов // Новые технологии в научных исследованиях, проектировании, управлении, производстве: труды Междун. науч.-техн. конф. Воронеж: ГБОУВО ВГТУ, 2017. - Т.2. - С. 33-37.
56. Бакиров М.Б. Развитие методологии многопараметрического расчетно-экспериментального мониторинга критических зон ответственного оборудования АЭС / М.Б. Бакиров, В.И. Левчук, В.П. Поваров и др. // 14-ая Международная конференция «Проблемы материаловедения при проектировании, изготовлении и эксплуатации оборудования АЭС», Санкт-Петербург, 2016. - С. 181-182.
57. Бакиров М.Б. Разработка и внедрение метода инструментального идентификации для эксплуатационного контроля металла ответственного оборудования АЭС / М.Б. Бакиров, И.В. Фролов, Е.М. Морозов и др. // 14-ая Международная конференция «Проблемы материаловедения при проектировании, изготовлении и эксплуатации оборудования АЭС», Санкт-Петербург, 2016. - С. 185-186.
58. Бакиров М.Б. Управление ресурсными характеристиками оборудования и трубопроводов с использованием процедуры поверхностного упрочнения / М.Б. Бакиров, И.А. Белуник, Б.И. Грибов // 14-ая Международная конференция «Проблемы материаловедения при проектировании, изготовлении и эксплуатации оборудования АЭС», Санкт-Петербург, 2016. - С. 177-178.
59. Поваров В.П. Распределенная информационно-управляющая система машины перегрузочной с двумя каналами управления, диагностики, защит и блокировок / В.П. Поваров, В.В. Коробкин, Е.А. Тумаков // Электротехнические комплексы и системы управления. - 2015. - № 1. - С. 43-47.
60. Поваров В.П. Программно-технические комплексы автоматизированных систем управления турбиной атомной электростанции / В.П. Поваров, А.В. Рыжков, Д.В. Терехов // Электротехнические комплексы и системы управления. - 2015. - № 1. - С. 48-52.
61. Андропов Е.В. Алгоритмизация управления диверсной системой комплексной защиты блоков АЭС / Е.В. Андропов, И.Р. Коган, В.П. Поваров, Л.П. Павлов // Вестник ВГТУ. - 2015. - Т. 11. № 5. - С. 51-58.
62. Бакиров М.Б. Опыт работ по использованию системы непрерывного мониторинга эксплуатационной повреждаемости металла в наиболее критических зонах ответственного оборудования АЭС на примере СС №111 энергоблока №5 Нововоронежской АЭС / М.Б. Бакиров, А.А. Еремин, В.И. Левчук, В.П. Поваров и др. // Сборник трудов 9-й международной научно-технической конференции «Обеспечение безопасности АЭС с ВВЭР», Подольск, 2015. - С. 240-

63. Поваров В.П. Алгоритмизация управления технологическими процессами эксплуатации пятого блока Нововоронежской АЭС / В.П. Поваров, И.Л. Витковский // Электротехнические комплексы и системы управления. – 2014 - № 4. - С. 29-32.

64. Бакиров М.Б. Анализ эксплуатационной нагруженности узла приварки коллектора к патрубку парогенератора ПГВ-1000 при нестационарных термосиловых воздействиях / М.Б. Бакиров, А.С. Киселев, В.И. Левчук, В.П. Поваров, А.Ф. Громов // Вестник ВГТУ. - 2014. - № 6.- С. 111-117.

65. Бакиров М.Б. Новый подход к исследованию причин повышенной повреждаемости ответственного оборудования АЭС / М.Б. Бакиров, В.П. Поваров, Д.А. Николаев, А.Ф. Громов, В.И. Левчук // Вестник ВГТУ. - 2014.- № 6.- С. 118-124.

66. Бакиров М.Б. Разработка технологии непрерывного контроля целостности металла в критических зонах оборудования АЭС ультразвуковым методом // М.Б. Бакиров, А.А. Еремин, В.И. Левчук, В.П. Поваров // Известия высших учебных заведений. Северо-Кавказский регион. Серия: Технические науки. - 2014. - № 6 (181). - С. 60-67.

67. Ткалич С.А. Модели принятия решений в системах управления потенциально-опасными производствами / С.А. Ткалич, В.П. Поваров, А.В. Бурковский А.В. // Вестник ВГТУ. - 2014. - Т. 10. - № 5-1. - С. 129-132.

68. Бакиров М.Б. Архитектура системы непрерывного мониторинга оборудования АЭС на примере парогенератора / М.Б. Бакиров, В.И. Левчук, С.М. Горохов, В.П. Поваров // Электротехнические комплексы и системы управления. - 2014. - № 4.- С.- 53-59.

69. Поваров В.П. Аспекты обоснования радиационной безопасности населения при продлении срока эксплуатации энергоблока № 4 Нововоронежской АЭС / В.П. Поваров, А.И. Федоров, С.Л. Витковский и др. // АНРИ. - 2014. - № 2 (77). - С. 53-59.

70. Бакиров М.Б. Управление ресурсными характеристиками парогенераторов 5-го энергоблока Нововоронежской АЭС на примере использования системы on-line мониторинга эксплуатационной нагруженности /М.Б. Бакиров, В.И. Левчук, В.П. Поваров, А.Ф. Громов // Сборник трудов международной научно-технической конференции «Полувековое обеспечение безопасности АЭС с ВВЭР в России и за рубежом», Нововоронеж, 2014. - С. 135-142.

71. Бакиров М.Б. Разработка и опытное внедрение системы мониторинга эксплуатационной повреждаемости металла сварного соединения приварки горячего коллектора к корпусу парогенератора 5-го энергоблока Нововоронежской АЭС / М.Б. Бакиров, В.И. Левчук В.И., В.П. Поваров и др. // Сборник трудов международной научно-технической конференции «Полувековое обеспечение безопасности АЭС с ВВЭР в России и за рубежом», Нововоронеж, 2014. - С. 158-172.

72. Bakirov M. Elaboration and installation of technology of on-line diagnostics equipment damage as a procedure of NPP lifetime management / M.B. Bakirov, V.P. Povarov // 3rd International Conference on NPP Life Management (PLIM) for Long Term Operations (LTO), Salt Lake City, UT, USA, 2012.

73. Иванов Е.А. Внедрение на Волгодонской АЭС автоматизированной системы радиационного контроля протечек парогенераторов / Е.А. Иванов, И.В. Пырков, В.П. Поваров и др. // АНРИ. - 2008. - № 3. - С. 22-24.

74. Летицкий В.А. Комплекс программно-технических средств для измерения нейтронно-физических характеристик в период пуска и освоения мощности первого энергоблока Волгодонской АЭС / В.А. Летицкий, Р.Э. Багдасаров, В.П. Поваров и др. // Известия высших учебных заведений. Электромеханика.- 2002. - № 5. - С. 62-64.