

УДК 53.083.9

**РАЗРАБОТКА И ВНЕДРЕНИЕ ТЕХНОЛОГИИ
ОПЕРАТИВНОЙ ДИАГНОСТИКИ ПОВРЕЖДЕНИЯ
ОТВЕТСТВЕННОГО ОБОРУДОВАНИЯ КАК ПРОЦЕДУРЫ
УПРАВЛЕНИЯ РЕСУРСОМ АЭС**

М. Б. Бакиров¹⁾, В. П. Поваров²⁾

¹⁾ *ООО “Центр материаловедения и управления ресурсом”,*

²⁾ *Нововоронежская атомная электростанция*

Поступила в редакцию 21.11.2014 г.

Аннотация: в отличие от общепринятых подходов, применяемых для диагностики оборудования АЭС, когда результаты контроля используются в качестве данных для численного расчетного анализа прочности, особенность нового предлагаемого подхода заключается в применении принципа “обратной задачи”. Внедрение нового подхода предполагает разработку детальной численной расчетной конечно-элементной модели контролируемого оборудования. Результаты предварительных расчетов позволяют выбрать определенные рациональные места для установки, а также подобрать типы датчиков контроля, предназначенных для повышения эффективности и точности работы расчетной модели. Как правило, датчики контроля включают в себя высокотемпературные тензодатчики, температурные зонды, датчики давления, ускорения и смещения, а также датчики акустической эмиссии и ультразвуковые датчики, применяемые для контроля фактической кинетики дефектности в зоне потенциального повреждения. Все датчики работают в режиме онлайн в течение нескольких лет эксплуатации. Выбрана оптимальная периодичность регистрации данных, все зарегистрированные данные после незамедлительной обработки передаются в конечно-элементный расчетный модуль для расчета прочности контролируемой зоны. Программные средства для прочностных расчетов должны быть основаны на отдельном расчетном коде, поскольку он также должен работать в режиме онлайн. Четкий анализ на прочность в сочетании с полученными результатами контроля кинетики дефектности позволяют не только прогнозировать наиболее неблагоприятный сценарий, приводящий к разрушению, но дают также возможность проводить срочный анализ и вырабатывать компенсирующие меры, позволяющие снижать эксплуатационные нагрузки.

Представлены результаты разработки и практического применения нового подхода для атомных электрических станций (АЭС) и соответствующая технология.

Ключевые слова: атомная электрическая станция (АЭС), диагностика повреждения оборудования, продление срока службы АЭС.

DEVELOPMENT AND IMPLEMENTATION OF THE ONLINE DIAGNOSTICS OF THE MAIN EQUIPMENT DAMAGE AS A NPP RESOURCE MANAGEMENT PROCEDURE

M. B. Bakirov, V. P. Povarov

Abstract: in contrast to conventional approaches used for diagnostics (i.e. when inspection results are used as data for numerical calculative strength analysis) the specific feature of the new proposed approach consists in a fact that the approach is based on application of the “inverse problem” principle. As regards to implementation of the proposed new approach, first of all a detailed numerical calculative finite-element model of the monitored equipment must be developed. Results of preliminary calculations allow to make reasonable selection of definite installation places and types of control sensors intended for more effective and precise work of the calculative model. As a rule, the control sensors are high-temperature strain gauges, temperature probes, pressure, acceleration and displacement sensors, as well as acoustic-emission and ultrasonic sensors used for monitoring of actual defectiveness kinetics in the zone of potential damaging. All the sensors work in the on-line mode during several years of operation, the optimal frequency of data records is selected, all recorded data after prompt processing are transferred to the finite-element calculative modulus for strength calculations of a monitored zone. Software for strength calculation must be based on an individual calculative code, since it should also work in the on-line mode. Comprehensible strength analysis in conjunction with obtained results of defectiveness kinetics monitoring allow not only to foresee the most unfavorable scenario resulting to damaging, but also to have a possibility for prompt analysis and elaboration of compensating measures allowing to reduce operational loadings. In the report the results of development and practical application of the new approach at nuclear power plants(NPP) and corresponding technology are presented.

Keywords: nuclearpowerplant (NPP), diagnostics of equipment damage, the lifetime extension.

ВВЕДЕНИЕ

Продление срока службы (ПСС) АЭС сверх первоначально прогнозируемого срока – это один из наиболее приоритетных видов деятельности в атомной энергетике Российской Федерации и за рубежом. Кроме анализа опыта, накопленного в течение многих лет эксплуатации АЭС с различными типами реакторов, в рамках деятельности по ПСС необходимо также принять обоснованный комплекс мероприятий, направленных на обеспечение безопасной и надежной эксплуатации АЭС в течение продленного срока эксплуатации.

Длительная эксплуатация АЭС обуславливает необходимость замены традиционных подходов, принятых для контроля состояния, и в первую очередь – скорости ухудшения состояния – “старения” в зонах, наиболее подверженных воздействию эксплуатационных нагрузок и входящих в состав оборудования, важного для безопасности. Значительный опыт работ, связанных с обоснованием продления срока службы АЭС России, позволяет предложить новый подход к диагностике эксплуатационной подверженности разрушению. Этот подход основан на применении общепринятых неразрушающих методов контроля в сочетании с оперативным контролем фактических тепловых нагрузок, фактической дефектности и численных расчетов накопленной подверженности металла разрушению в зонах контроля. Блок-схема срока службы тепломеханического оборудования АЭС представлена на рис. 1. Показаны все основные этапы, начиная с проектирования и заканчивая выводом из эксплуатации.

Детальный анализ основных этапов срока службы оборудования АЭС, а также накопленный опыт длительной эксплуатации энергоблоков АЭС позволяют сделать вывод о том, что традиционные подходы к оценкам технического состояния тепломеханического оборудования АЭС недостаточно информативны с точки зрения решения сложных проблем эксплуатационного разрушения, возникающего в процессе длительной эксплуатации АЭС. В особенности

это касается основного оборудования технологических систем, важных для безопасности. Самые острые проблемы эксплуатационного разрушения, как правило, характеризуются следующим:

- случаи разрушения имеют регулярный и неконтролируемый характер;
 - эксплуатационные трещины могут значительно увеличиваться за короткий период эксплуатации; это является прямой угрозой безопасности АЭС и противоречит главным требованиям безопасности, установленным отраслевыми нормативными документами;
 - ежегодный эксплуатационный контроль не может гарантировать, что сквозные трещины не появятся в течение топливной кампании при работе энергоблока АЭС на мощности;
 - точные механизмы формирования и роста трещин не ясны;
 - реализованные корректирующие мероприятия не привели к очевидным результатам;
- ремонт поврежденных участков оказывает отрицательное воздействие на ресурсные характеристики оборудования, и может потенциально привести к преждевременной замене.



Рис. 1. Срок службы тепломеханического оборудования АЭС

Решение указанной проблемы заключается в разработке и применении программируемой диагностической системы контроля эксплуатационного разрушения и фактического состояния нагружения основного оборудования АЭС, подверженного растрескиванию и интенсивному расширению.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

1. Философия нового подхода к контролю эксплуатационного разрушения и обоснованию жизнеспособности оборудования АЭС в процессе длительной эксплуатации

Отличие предлагаемого подхода от общепринятых, применяемых для диагностики, когда результаты контроля используются в качестве данных для численного расчетного анализа прочности, заключается в том, что в новом подходе используется принцип “обратной задачи”. Существующий уровень развития прочностного анализа дает возможность рассчитать поведение практически любого дефекта, но для получения правильного решения необходимо иметь намного больше информации, чем можно получить, используя даже самые современные методы и средства неразрушающего контроля. Что касается внедрения предлагаемого нового подхода, в первую очередь, он заключается в создании детальной численной расчетной конечно-элементной модели контролируемого оборудования. На следующем этапе выполняются предварительные расчеты эксплуатационных нагрузок с использованием показаний существующих штатных датчиков на энергоблоке АЭС, контролирующими основные параметры работы оборудования. Результаты предварительных расчетов позволяют выбрать определенные рациональные места для установки датчиков контроля и их типы с целью более эффективной и точной работы расчетной модели. Как правило, датчики контроля включают в себя высокотемпературные тензодатчики, температурные зонды, а также датчики давления, ускорения и смещения. Кроме того, в зоне потенциального разрушения устанавливаются также специальные высокотемпературные датчики, предназначенные для контроля фактической кинетики дефектности. Для этой цели существует два вида независимых датчиков: датчики акустической эмиссии и ультразвуковые датчики. Все датчики работают в режиме онлайн в течение нескольких лет эксплуатации, выбрана оптимальная периодичность регистрации данных, все полученные данные после незамедлительной обработки передаются в конечно-элементный расчетный модуль для расчета прочности контролируемой зоны. Периодически, как правило, раз в год в зоне контроля проводится комплексный неразрушающий контроль: механических свойств (методом кинетического вдавливания), целостности металла (методом фазированной решетки), остаточных напряжений (магнитным методом). Эти данные позволяют выполнить текущую оценку качества конструкционного материала в зоне контроля, а также являются источником дополнительной подтверждающей информации, связанной с работой диагностической системы в целом и расчетного модуля в частности. Программные средства для прочностных расчетов должны быть основаны на отдельном расчетном коде, поскольку он также должен работать в режиме онлайн. Расчетный код представляет собой аттестованное программное средство для прочностных расчетов с открытым программным интерфейсом, что позволяет пользователю на уровне программирования вносить изменения, требуемые для адаптации кода к конкретной расчетной задаче, а также для работы в режиме онлайн с использованием экспериментальных данных. Такой подход позволяет выполнить срочную верификацию расчетной модели с применением фактических показаний датчиков контроля. Совместное использование датчиков тепловых нагрузок и датчиков контроля дефектности в качестве средств контроля в сочетании с одновременно работающими расчетными модулями анализа прочности позволяют не только прогнозировать наиболее неблагоприятный сценарий, приводящий к разрушению, но дают также возможность проводить срочный анализ и вырабатывать компенсирующие меры, позволяющие снижать эксплуатационные нагрузки. Такие рекомендации по реализации компенсирующих мероприятий позволяют разработать эффективный план мероприятий по модернизации, который считается самым эффективным процессом обеспечения продления срока службы АЭС сверх проектного.

Блок-схема связей при реализации работ по контролю эксплуатационной повреждаемости

и обоснованию жизнеспособности оборудования АЭС при длительной эксплуатации представлена на рис. 2.

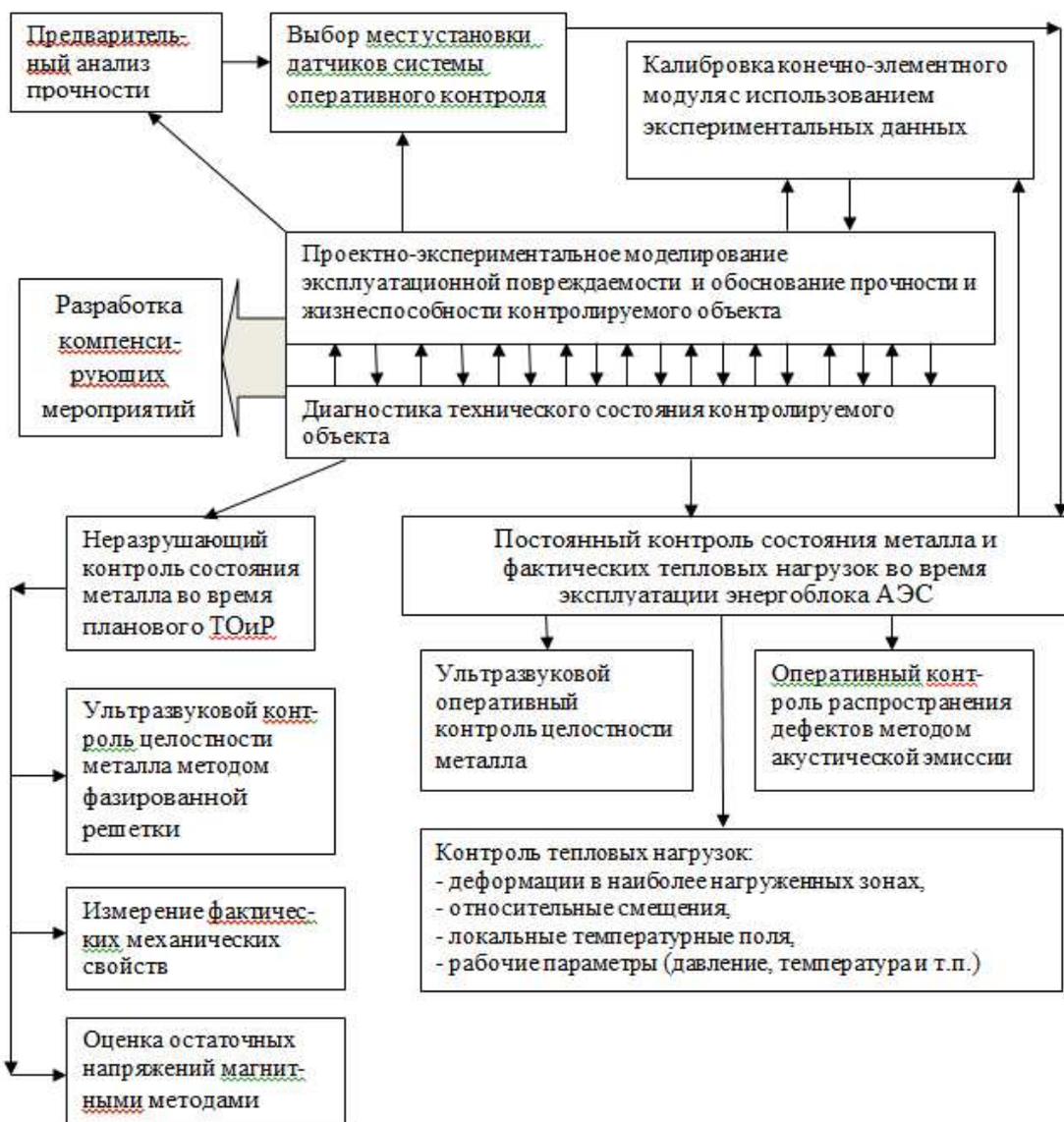


Рис. 2. Блок-схема связей при реализации работ

Таким образом, применение нового подхода к диагностике оборудования дает АЭС новый инструмент, позволяющий быстро, и главное – эффективно решать следующие основные задачи:

- повышение эксплуатационной безопасности энергоблоков АЭС;
- определение причинно-следственных связей образования и распространения дефектов в критической зоне, выяснение доминирующих механизмов и факторов, обуславливающих разрушение;
- разработка эффективных компенсирующих мероприятий, направленных на устранение или существенное смягчение влияния основных повреждающих факторов, способствующих образованию и росту дефектов;
- разработка новых критериев приемлемости выявленных эксплуатационных трещин (в зависимости от длины, высоты, эквивалентной площади, ориентации, местоположения по пери-

метру) с целью обоснованного снижения консерватизма, который применяется в настоящее время при отбраковке дефектов в соответствии с действующими отраслевыми нормами оценки качества;

— сокращение количества неоправданных профилактических ремонтных работ для устранения “неопасных” приемлемых дефектов путем их постоянного оперативного контроля в режиме он-лайн во время эксплуатации.

2. Пример практического применения нового подхода контроля на АЭС и основные этапы работ

Описанная выше концепция нового подхода была применена недавно в полном объеме на действующем оборудовании АЭС. Система контроля эксплуатационных повреждений и тепловых нагрузок в режиме онлайн успешно работает в настоящее время. Поскольку предлагаемый подход имеет универсальный характер и может быть легко применен для контроля практически любых критических зон на любом оборудовании или трубопроводе, в данной публикации при описании основных этапов работы было решено абстрагироваться от конкретного примера и сконцентрировать основное внимание на общих характеристиках нового подхода.

На первом этапе была создана первичная конечно-элементная модель технологической системы с замкнутым контуром (см. рис. 3). Выбранная система представляла особый интерес вследствие необходимости решения нескольких задач, перечисленных выше. Следует заметить, что создание модели замкнутой системы означает выполнение максимально

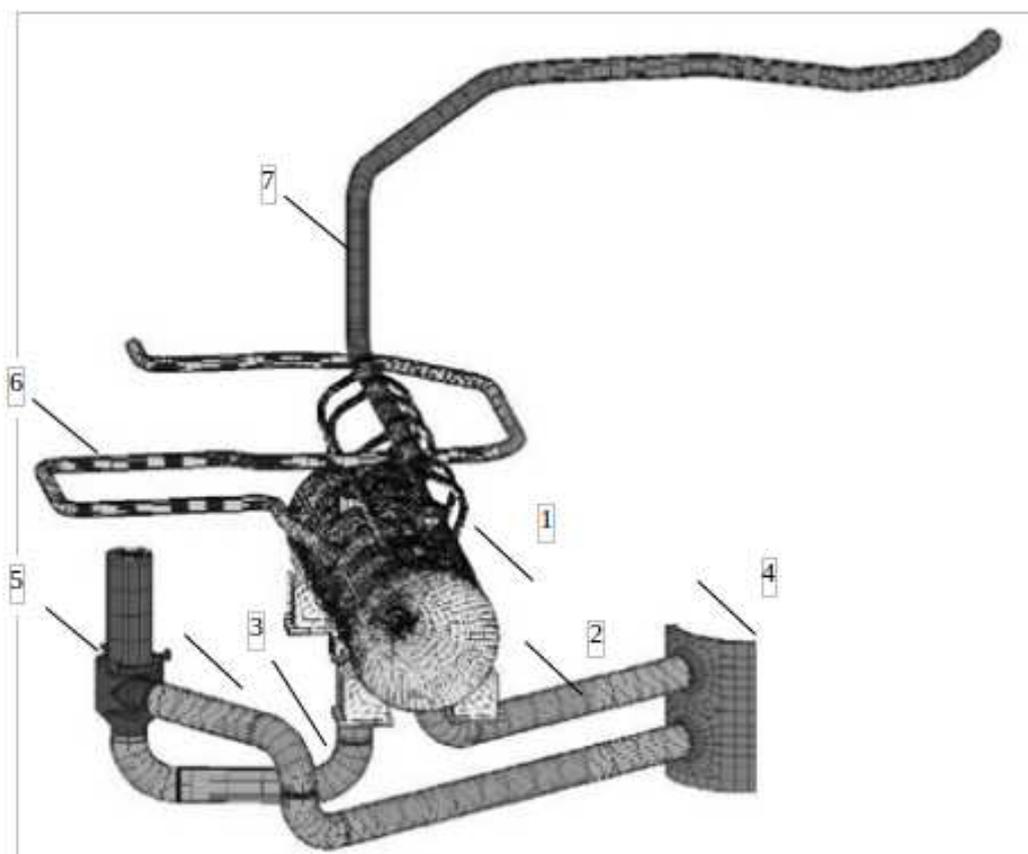


Рис. 3. Первичная конечно-элементная модель

1 – парогенератор с опорами; 2 – горячая нитка главного циркуляционного трубопровода, 3 – холодная нитка главного циркуляционного трубопровода; 4 – фрагмент корпуса реактора, 5 – главный циркуляционный насос, 6 – трубопровод питательной воды, 7 – паропровод

детализированного моделирования элементов системы – корпусов под давлением, соединительных трубопроводов, опор, подвесок, и т.п., которые оказывают влияние на напряженно-деформированное состояние элементов контура.

На втором этапе были выполнены предварительные расчеты на прочность с применением построенной конечно-элементной модели. Результаты расчетов использовались для определения конкретных зон, которые подвергаются максимальным напряжениям и потенциально опасны с точки зрения распространения эксплуатационных дефектов. Важно отметить, что предварительные результаты прочностного анализа рассматриваются вместе с результатами анализа данных периодического эксплуатационного контроля и истории эксплуатации. Такой подход позволяет объективным образом выбрать зоны, которые представляют наибольшую опасность и требуют тщательного детализированного контроля. Для достижения более эффективной работы системы контроля необходимо построить систему таким образом, чтобы данные дополнительных датчиков контроля (тензодатчиков, термопар, датчиков смещения, ультразвуковых и акустических датчиков и т.п.) в сочетании с данными, полученными со штатных датчиков (давления, термопар, расходомеров и т.п.), позволили бы получить максимально полную информацию о состоянии контролируемого объекта.

Затем для одной или нескольких избранных зон контролируемого объекта необходимо определить требуемые виды датчиков контроля, включая их количество, технические характеристики и точные места установки датчиков. Принцип оптимизации схемы размещения датчиков должен соблюдаться в любом случае.

На третьем этапе была разработана архитектура системы контроля эксплуатационных разрушений и тепловых нагрузок. Одна из основных задач применения системы контроля заключается в получении достоверной информации по фактическому напряженно-деформированному состоянию и дефектности контролируемого объекта, в зависимости от различных технологических режимов эксплуатации энергоблока АЭС. Более того, данные контроля должны собираться в таком объеме, который был бы необходимым и достаточным для составления корректного проектно-экспериментального обоснования прочности контролируемого объекта, накопленной повреждаемости (остаточного ресурса) и жизнеспособности, путем применения конечно-элементной модели.

Учитывая эксплуатационные характеристики контролируемого объекта, при разработке системы контроля принимались во внимание следующие требования:

- система должна работать непрерывно в течение как минимум одной топливной кампании, без возможности доступа персонала к выполнению каких-либо работ по обслуживанию и с учетом необходимости размещения системы внутри герметичных помещений;
- должны гарантироваться надежность, срок эксплуатации, жизнеспособность и оптимальные температурные режимы работы системы, с учетом сложных условий, в которых должна эксплуатироваться система (повышенная температура, влажность);
- необходимо обеспечить возможность дистанционного управления работой системы, сохранение значительного объема собранных данных, оперативную передачу данных конечному пользователю и быстрый анализ;
- измерительное оборудование (датчики, смазка для акустической связи, вспомогательная аппаратура) должны выбираться оптимальным образом с учетом того, что температура внешней поверхности контролируемого металла достигает 300 °С.

С учетом указанных выше требований и заданных функций системы контроля ее составляющими в целом стали следующие подсистемы:

подсистема оперативного ультразвукового (УЗ) онлайн контроля с применением высокотемпературных УЗ-датчиков, предназначенная для оценки скорости роста дефектов в различных режимах эксплуатации; подсистема оперативного он-лайн контроля методом акустической эмиссии (АЭ) с применением высокотемпературных АЭ-датчиков, сканирующих опре-

деленные секторы зоны контроля, предназначенная для определения момента образования трещины и ее интенсивного роста в различных режимах эксплуатации; подсистема онлайн контроля тепло-деформационных нагрузок и смещения с датчиками контроля температуры, деформации, смещения, предназначенная для сбора достоверных данных по фактическим тепломеханическим нагрузкам в зоне контроля.

Архитектура разработанной системы контроля и схема связей процесса обмена данными показана на рис. 4.

На четвертом этапе были спроектированы и изготовлены оборудование и средства измерения для системы контроля.

Учитывая многофункциональные задачи, которые должны выполняться системой, и с целью унификации отдельных конструктивных модулей (подсистем), было принято решение создать систему контроля на базе многоканальных микропроцессорных измерительных модулей, основанных на оборудовании компании Отечественные Приборы (National Instruments) и интегрированных в единый измерительно-расчетный комплекс.

Для решения специфических задач было разработано специальное программное обеспечение, предназначенное для дистанционного управления работой системы, тестирования работоспособности системы и сбора, хранения и передачи данных, предварительного анализа собранных данных и т.д.

Учитывая конструктивные особенности контролируемого объекта и принятую схему размещения датчиков контроля, были разработаны и изготовлены специальные приспособления для крепления элементов системы к контролируемому объекту (см. рис. 5).

На пятом этапе были выполнены работы по монтажу, настройке и испытаниям всех модулей системы контроля. Опытная эксплуатация системы в непрерывном режиме осуществлялась в течение одного месяца. Испытания проводились в лаборатории, на полномасштабном испытательном стенде, точно моделирующем зону контроля. Испытательный стенд включал реальный сегмент подлежащей контролю зоны, вырезанный из демонтированного оборудования.

На шестом этапе были выполнены работы по монтажу, настройке и испытаниям системы контроля на энергоблоке АЭС.

На седьмом этапе были выполнены работы по настройке и калибровке расчетного конечно-элементного модуля. Специальная программа, разработанная для проектно-экспериментального анализа напряженного состояния и безотказной работы контролируемой зоны, стала центральным ядром системы контроля. Эта программа работает параллельно со сбором диагностических данных по измерительным каналам системы контроля. Конечно-элементная модель контролируемого объекта содержит контрольные узлы в местах расположения датчиков контроля. В контрольных узлах результаты расчетов должны сравниваться с реально измеренными данными по температурам, смещениям и деформациям. Отличительная особенность модели заключается в способности использовать результаты непрерывного контроля объекта (поля температур, деформации, смещения, давление) как в качестве фактических входных данных для расчетов, так и в качестве данных испытаний для настройки и калибровки конечно-элементного модуля.

Калибровка конечно-элементного модуля выполнялась путем сравнения расчетных данных в контрольных узлах и экспериментальных данных о деформациях, смещениях и температурах в разных эксплуатационных режимах и при разных уровнях нагружения контролируемого объекта. Данные по давлению и температурам, зарегистрированные штатными датчиками на энергоблоках АЭС, использовались в конечно-элементном модуле в качестве фактических параметров силы нагружения объекта. В случае если удовлетворительное совпадение расчетных и экспериментальных данных не получено, необходимо внести определенные усовершенствования в вычислительное ядро, т.е. произвести ревизию программы, уточнение

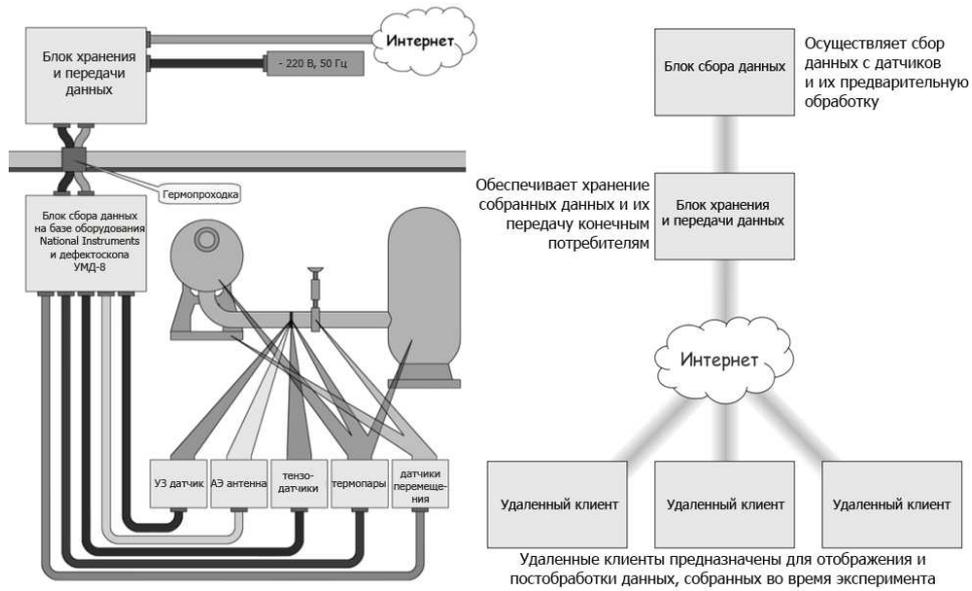
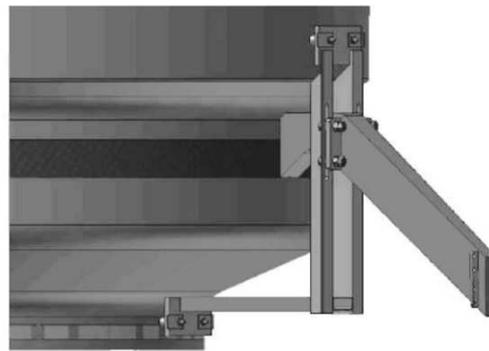


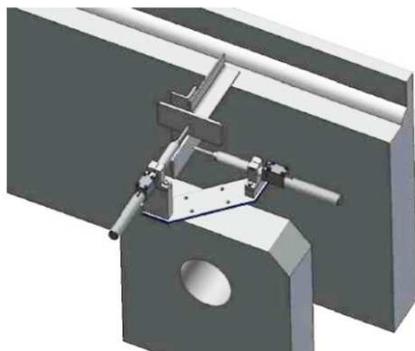
Рис. 4. Архитектура системы контроля



Крепление датчиков АЭ (акустико-эмиссионных)



Крепление УЗ-датчиков (ультразвуковых)



Контроль смещений оборудования



Контроль смещений трубопроводов

Рис. 5. Общий вид специальных приспособлений для крепления

геометрии контролируемого объекта, изменение решетки конечных элементов в определенных зонах, корректировку граничных условий и др. Как правило, удовлетворительная согласованность расчетных и экспериментальных данных может быть достигнута только после нескольких итераций.

После настройки и калибровки конечно-элементного расчетного модуля и последующего сравнительного анализа экспериментальных и расчетных данных была достигнута хорошая согласованность (см. рис. 6). Это позволило сделать вывод об эффективности разработан-

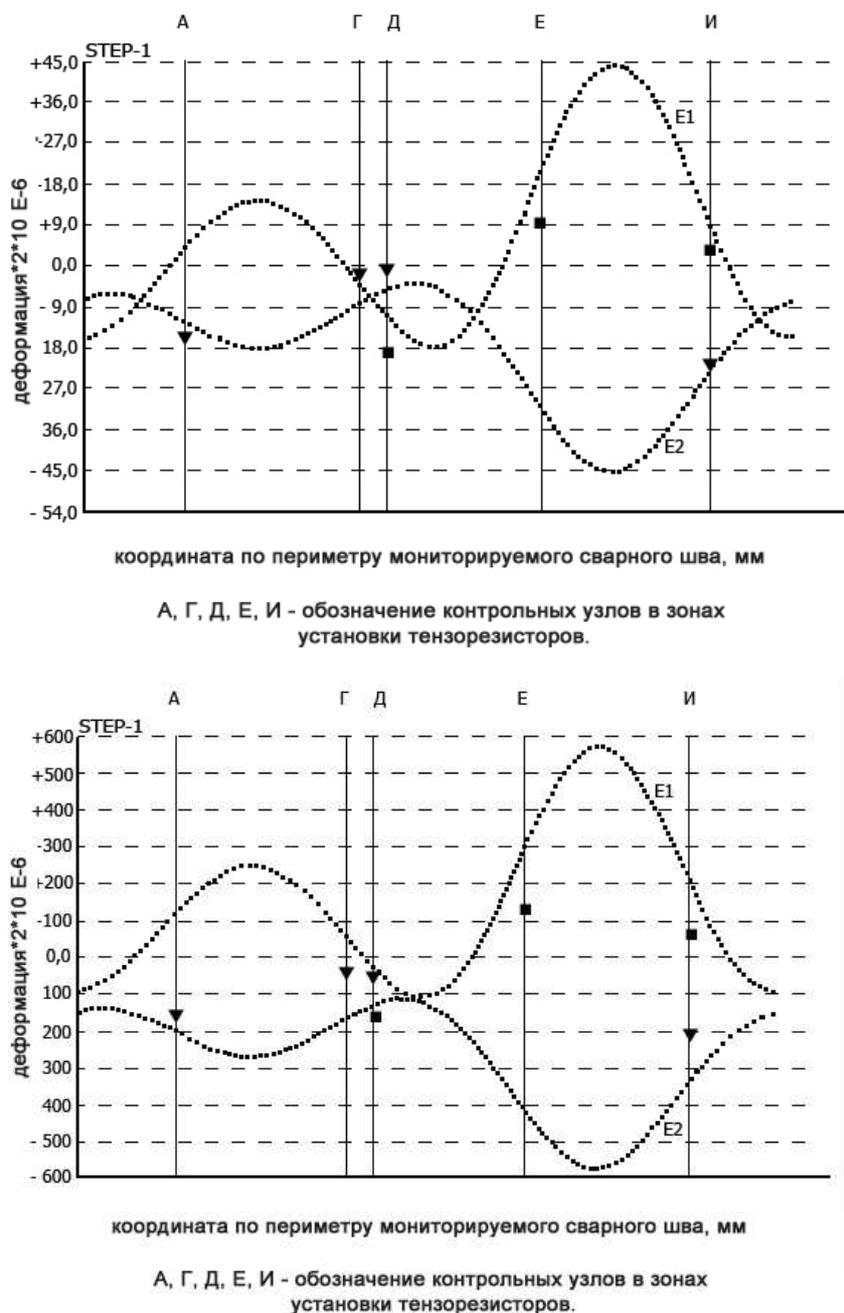


Рис. 6. Сравнение расчетных (черные треугольники и квадраты) и экспериментальных (кривые) данных о деформациях в контролируемой зоне при различных параметрах нагружения

ной модели и адекватности моделирования напряженного состояния объекта в различных эксплуатационных режимах.

На восьмом этапе производилась непрерывная регистрация данных контроля одновременно с работой расчетного ядра. Система контроля обеспечивает возможность выполнения оперативных оценок кинетики зарождения и распространения эксплуатационных трещин, и соответствующий расчетный анализ позволяет построить картины напряженных состояний в зоне контроля в любые моменты времени, используя параметры нагружения в качестве входных данных. В конечном итоге, система позволяет оценивать фактически накопленную подверженность разрушению, принимая во внимание зарегистрированные циклы эксплуатационного нагружения, а также выдавать обоснованный прогноз относительно ресурса стойкости и жизнеспособности контролируемого объекта. Более того, все события, регистрируемые системой контроля, анализируются с учетом эксплуатационных режимов, имевших место в определенный период времени, его характеристик и технологических особенностей. Это позволяет реализовать устойчивую обратную связь от состояния дефектности металла, в зависимости от фактических технологических факторов и параметров, и понять причинно-следственную связь, обуславливающую зарождение и рост дефектов.

За определенный период времени была накоплена база данных о состоянии контролируемого оборудования в различных эксплуатационных режимах. Соответствующий комплексный анализ напряженного состояния и подверженности разрушению был также выполнен в описанном примере практического применения нового подхода. Полученные данные позволили разработать эффективные компенсирующие меры, направленные на ослабление влияния основных повреждающих факторов и на повышение ресурса работы контролируемого объекта.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Анализ результатов эксплуатации интеллектуальной системы оперативного контроля эксплуатационного повреждения оборудования показывает, что система является высокоэффективной и надежной. В настоящее время в стадии разработки находится аналогичная система, предназначенная для контроля бетонных конструкций.

Установка штатной диагностической системы для контроля роста дефектов в критических зонах позволяет повысить безопасность энергоблока АЭС в целом и минимизировать риски образования критических трещин при работе блока на мощности.

Принимая во внимание приобретенный положительный опыт, в качестве эффективной компенсирующей меры рекомендуется установка аналогичных диагностических систем для контроля критического оборудования энергоблоков АЭС, подверженного образованию трещин и их интенсивному росту в процессе эксплуатации.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

[1] Технический отчет “Разработка, изготовление, калибровка и отладка системы комплексного мониторинга целостности металла на основании термо-деформационной нагруженности зоны кармана коллектора ПГ и момента развития дефекта в зоне СС №111 на полномасштабном стенде. Разработка технологии выполнения сбора данных системы комплексного мониторинга термо-деформационной нагруженности и момента развития трещины (целостности) металла корпуса ПГВ-1000 в зоне сварного шва № 111 приварки коллектора теплоносителя 1-го контура к патрубку Ду 1200”, ООО “НСУЦ “ЦМиР”, Москва, 2011 г.

[2] Рабочая программа по оснащению парогенератора ПГВ-1000М (5ПГ-4) энергоблока №5 Нововоронежской АЭС системой непрерывного мониторинга эксплуатационной повреждаемости сварного шва №111/1. Проведение контроля сварного шва №111/1 в течение 28 топливной кампании. Нововоронежская АЭС, 2011 г.

[3] Технический отчет “Обработка и анализ данных комплексного измерительного мони-

торинга целостности металла СС №111-1 5ПГ-4 приварки коллектора теплоносителя 1-го контура к патрубку ДУ 1200 на этапе пуска, эксплуатации и останова 5-го блока НВАЭС (Итоговый). ООО “НСУЦ “ЦМиР”, Москва, 2012 г.

[4] Технический отчет “Сбор, обработка и анализ данных непрерывного мониторинга эксплуатационной повреждаемости и фактической термо-деформационной нагруженности СС №111-1 на этапах пуска, эксплуатации и останова 5 блока НВАЭС в течение 29-й топливной кампании” (итоговый). ООО “НСУЦ “ЦМиР”, Москва, 2013 г.

REFERENCES

[1] Technical report “Development, manufacture, calibration and setting up of integrated monitoring system of metal integrity based on thermal strain loading of the SG header pocket and from the moment of flaw development in the area of welding joint №111 at the full scope testing facility. Development of data acquisition technology for integrated monitoring of thermal strain loading and a point of crack (integrity) development in the SG -1000 weld joint № 111 welding area of the primary header to the pipeline DN 1200”, “NSUTS “TSMIR” Ltd, Moscow, 2011. [Texnicheskij otchet “Razrabotka, izgotovlenie, kalibrovka i otladka sistemy kompleksnogo monitoringa celostnosti metalla na osnovanii termo-deformacionnoj nagruzhennosti zony karmana kollektora PG i momenta razvitiya defekta v zone SS №111 na polnomasshtabnom stende. Razrabotka texnologii vypolneniya sbora dannyx sistemy kompleksnogo monitoringa termo-deformacionnoj nagruzhennosti i momenta razvitiya treshhiny (celostnosti) metalla korpusa PGV-1000 v zone svarnogo shva № 111 privarki kollektora teplonositelya 1-go kontura k patrubku Du 1200”, ООО “NSUC “СМиР”, Москва, 2011 г.].

[2] Working program for equipment of Novovoronezh Unit 5 SG PGV-1000M (5PG-4) with on-line monitoring system of welding joint №111/1 damageability in the process of operation. Welding joint №111/1 inspection during the 28th core life. Novovoronezh NPP, 2011. [Rabochaya programma po osnashheniyu parogeneratora PGV-1000M (5PG-4) e'nergobloka №5 Novovoronezhskoj AE'S sistemoy nepreryvnogo monitoringa e'kspluatacionnoj povrezhdaemosti svarnogo shva №111/1. Provedenie kontrolya svarnogo shva №111/1 v techenie 28 toplivnoj kampanii. Novovoronezhskaya AE'S, 2011 г.].

[3] Technical report “Processing and analysis of integrated measuring monitoring metal integrity data of 5SG-4 welding joint №111-1 of the primary circuit header to the nozzle DN 1200 at the stage of Novovoronezh Unit 5 start up, operation and shutdown (Final). “NSUTS “TSMIR” Ltd., Moscow, 2012. [Texnicheskij otchet “Obrabotka i analiz dannyx kompleksnogo izmeritel'nogo monitoringa celostnosti metalla SS №111-1 5PG-4 privarki kollektora teplonositelya 1-go kontura k patrubku DU 1200 na e'tape puska, e'kspluatatsii i ostanova 5-go bloka NVAE'S (Itogovyj). ООО “NSUC “СМиР”, Москва, 2012 г.].

[4] Technical report “Acquisition, processing and analysis of on-line operational monitoring damageability data and actual thermal strain loading of welding joint №111-1 at the stage of Novovoronezh NPP start up, operation and shutdown during the 29th core life” (final). “NSUTS “TSMIR” Ltd., Moscow, 2013. [Texnicheskij otchet “Sbor, obrabotka i analiz dannyx nepreryvnogo monitoringa e'kspluatacionnoj povrezhdaemosti i fakticheskoj termo-deformacionnoj nagruzhennosti SS №111-1 na e'tapax puska, e'kspluatatsii i ostanova 5 bloka NVAE'S v techenie 29-j toplivnoj kampanii” (itogovyj). ООО “NSUC “СМиР”, Москва, 2013 г.].

Бакиров Мурат Баязитович, Доктор технических наук, Генеральный директор Общества с ограниченной ответственностью “Научно-сертификационный учебный центр материаловедения и ресурса компонентов ядерной техники “Центр материаловедения и ресурса” (ООО “НСУЦ “ЦМур”)

E-mail: info@expresstest.ru

Bakirov Murat Bayazitovich, Dr.-Ing, Director general of “Scientific-certification training centre of material science and nuclear components service life “Material science and service life centre” Ltd (“NSUTS “TSMIR” Ltd.)

E-mail: info@expresstest.ru

Поваров Владимир Петрович, Кандидат технических наук, Заместитель Генерального директора - директор филиала ОАО «Концерн Энергоатом» «Нововоронежская атомная станция»

Povarov Vladimir Petrovich, Ph. D of Engineering Science, General Director Deputy – Director of JSC «Rosenergoatom» branch «Novovoronezh Power Plant»