

УДК 621.039

РАЗРАБОТКА ТЕХНОЛОГИИ НЕПРЕРЫВНОГО АКУСТИКО- ЭМИССИОННОГО МОНИТОРИНГА ЭКСПЛУАТАЦИОННОЙ ПОВРЕЖДАЕМОСТИ МЕТАЛЛА ОТВЕТСТВЕННОГО ОБОРУДОВАНИЯ АТОМНЫХ СТАНЦИЙ

М.Б. Бакиров, В.П. Поваров*, А.Ф. Громов*, В.И. Левчук

Общество с ограниченной ответственностью «Научно-сертификационный учебный центр материаловедения и ресурса компонентов ядерной техники «Центр материаловедения и ресурса» ООО «НСУЦ «ЦМиР». 140002, Московская обл., г. Люберцы, ул. Кирова, д. 7, офис 5

** Филиал ОАО «Концерн Росэнергоатом» «Нововоронежская атомная станция». 396071, Россия, Воронежская обл., г. Нововоронеж*

Р

Обеспечение безопасной эксплуатации основного оборудования атомных станций, отработавших проектный ресурс, требует разработки новых подходов к диагностике и контролю целостности в связи с высоким уровнем старения металла.

Эти подходы должны строиться на использовании неразрушающих методов контроля, позволяющих проводить освидетельствование оборудования не только в ремонтный период, но и в процессе эксплуатации, когда происходит зарождение и развитие опасных дефектов. Среди современных методов неразрушающего контроля, пригодных для использования в процессе эксплуатации, высокую эффективность демонстрирует метод акустической эмиссии. В статье представлены результаты работы по разработке многопараметрической системы акустико-эмиссионного контроля повреждаемости оборудования атомной станции в процессе эксплуатации блока с учетом специфики контроля в условиях АЭС. Последовательно описаны этапы проведенной работы с оценкой и учетом всех влияющих факторов на разрабатываемую систему, а именно, необходимость сохранения работоспособности системы в условиях длительной эксплуатации при высокой температуре, сложной геометрии объекта контроля, повышенного уровня помех, а также сбор и передача контрольной информации по интранету для ее оперативной обработки и представления данных. Описан ряд экспериментов по отладке работы системы в лабораторных условиях, проведенных для уточнения и проверки выбранных методик контроля.

Ключевые слова: атомная станция, акустическая эмиссия, дефект, кластер, локация, мониторинг, парогенератор, повреждаемость, преобразователь, сварной шов, эксплуатация.

Традиционный подход к анализу целостности оборудования и трубопроводов АЭС строится, в основном, на проведении неразрушающего ультразвукового контроля (УЗК) металла оборудования и трубопроводов. Такой подход не дает возможности определить момент зарождения дефекта и строится на допущении того, что при остановке блока на плановый ремонт дефект будет своевременно выявлен и динамика его развития не даст ему быстро прорасти до недопустимого уровня, когда происходит его быстрое развитие до сквозного с потерей теплоносителя. Предпочтительнее было бы контролировать состояние целостности в процессе эксплуатации оборудования, когда и происходит зарождение и развитие дефектов. Из всех известных методов неразрушающего контроля метод акустической эмиссии является наиболее подходящим для решения такой задачи [1 – 3]. По сравнению с другими методами неразрушающего контроля (НК) метод акустической эмиссии (АЭ) имеет ряд преимуществ:

- возможность проведения эксплуатационного контроля и обнаружение развивающихся дефектов непосредственно в ходе эксплуатации и, следовательно, наиболее опасных дефектов в наиболее нагруженных компонентах реакторной установки;
- возможность определения мест расположения дефектов (трещин, зон пластической деформации, утечек и др.), находящихся достаточно далеко от приемных преобразователей;
- контроль в реальном масштабе времени и, как следствие, своевременное обнаружение течи теплоносителя из сосудов давления и трубопроводов в труднодоступных местах ядерной энергетической установки при развитии аварийной ситуации;
- совместимость АЭ-метода с другими методами НК, в частности УЗК, что позволяет за счет использования нескольких независимых методов повысить надежность результатов контроля;
- возможность проведения дистанционного автоматизированного контроля в небслуживаемых радиационно опасных помещениях атомной станции.

Несмотря на эти очевидные достоинства сложившаяся практика показывает, что метод акустической эмиссии мало используется на практике в условиях российских атомных станций. Исключение, пожалуй, составляет только внедрение метода АЭ для диагностирования течи трубопроводов первого контура АЭС с ВВЭР в рамках внедрения концепции ТПР (течи перед разрушением) [4 – 6].

Такая очевидная недооценка АЭ-метода связана, на наш взгляд, с отсутствием общепринятых соотношений, связывающих параметры АЭ-сигналов с различного рода повреждаемостью металла оборудования АЭС; трудностью выделения полезных АЭ-сигналов на фоне сильных шумовых помех от работающего оборудования; отсутствием штатных первичных преобразователей (АЭ-датчиков) и электронных блоков селекции, усиления, преобразования АЭ-сигналов, работающих длительное время без потери служебных свойств в условиях высоких полей температур и ионизирующего излучения; отсутствием долгоживущих высокотемпературных контактных смазочных материалов для обеспечения акустического контакта преобразователя с объектом контроля.

Следует отметить, что практика адаптации различных методов НК показывает, что наиболее эффективным является путь, при котором происходит доработка и усовершенствование методики контроля и аппаратных средств по ее реализации.

В нашем случае мы хотели применить метод АЭ для контроля целостности металла зоны СС №111 приварки «горячего» коллектора теплоносителя первого контура к патрубку Ду 1200 парогенератора (ПГ) пятого энергоблока НВАЭС.

Опыт эксплуатации парогенераторов ПГВ-1000 показывает, что в зоне СС №111 (рис. 1) регулярно зарождаются и растут эксплуатационные трещины; в ряде случаев трещина проходит через всю 70-миллиметровую толщину стенки корпуса до образования течи теплоносителя [7].

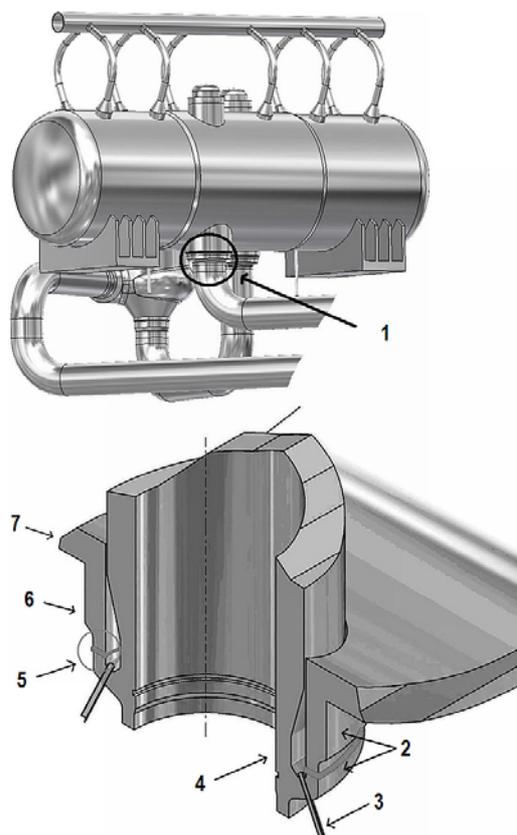


Рис. 1. Узел приварки коллектора теплоносителя первого контура к патрубку Ду 1200 парогенератора ПГВ-1000М, где происходит образование эксплуатационных дефектов (трещин): 1 – зона СС №111 ПГ; 2 – места установки АЭ-датчиков; 3 – патрубок продувки Ду 80; 4 – коллектор; 5 – зона разрушения СС №111; 6 – патрубок ПГ; 7 – корпус ПГ

Необходимо разработать такую систему АЭ-контроля, которая в течение одной топливной кампании (около года) начиная с момента пуска энергоблока до его останова на очередной плановый предупредительный ремонт (ППР) в on-line режиме осуществляла бы мониторинг всего периметра СС №111. Система должна обеспечивать сбор и хранение данных, их оперативную обработку и анализ с целью определения зон возможного образования и роста дефектов. Передача акустических данных должна осуществляться непрерывно по интранету непосредственно в организацию, обеспечивающую научно-техническую поддержку АЭС.

В решении проблемы СС №111 экспресс-обработка данных мониторинга в ряде случаев позволяет не только определить момент дефектообразования, но и оценить причинно-следственные связи, вызывающие рост трещины, на основе анализа условий эксплуатации, предшествующих разрушению [8].

Работа была поделена на четыре этапа.

Первый этап работы был направлен на подбор и тестирование оборудования для проведения АЭ-диагностики. К оборудованию относят высокотемпературные преобразователи (датчики) АЭ-сигналов; устройства их крепления на объекте контроля;

средства обеспечения стабильности акустического контакта – контактные жидкости и смазки; имитаторы модельных АЭ-сигналов для проверки работоспособности диагностического оборудования, электронные блоки для селекции, усиления и преобразования АЭ-сигналов; вычислительные средства для обработки и представления результатов, включая специализированное программное обеспечение; дополнительное оборудование для лабораторных исследований с учетом имитации работы в условиях АЭС (повышенная температура, вибрация, шумы, сопровождающие работу контролируемого объекта).

Второй этап был посвящен разработке методики акустико-эмиссионной диагностики с учетом результатов работ по первому кластеру. Для разработки методики были проведены следующие мероприятия.

1. Проанализированы проектная и конструкторская документация на контролируемое оборудование, условия и режимы эксплуатации ПГ, изучена информация о его техническом состоянии за предыдущее время эксплуатации, проведен экспертный ультразвуковой контроль металла СС №111 – контроль фазированными решетками для выявления слабых мест и выявлена зона, потенциально склонная к дефектообразованию за счет существования исходного технологического дефекта ниже браковочного уровня.

2. С учетом особенностей конструкции и выявленной потенциально опасной зоны с исходным дефектом был разработан, спроектирован и изготовлен полномасштабный стенд (рис. 2), имитирующий зону СС №111. Стенд включает в себя крупногабаритный тест-образец, вырезанный непосредственно из зоны СС №111 патрубка ПГ, замененного по причинам массового повреждения теплообменных труб.

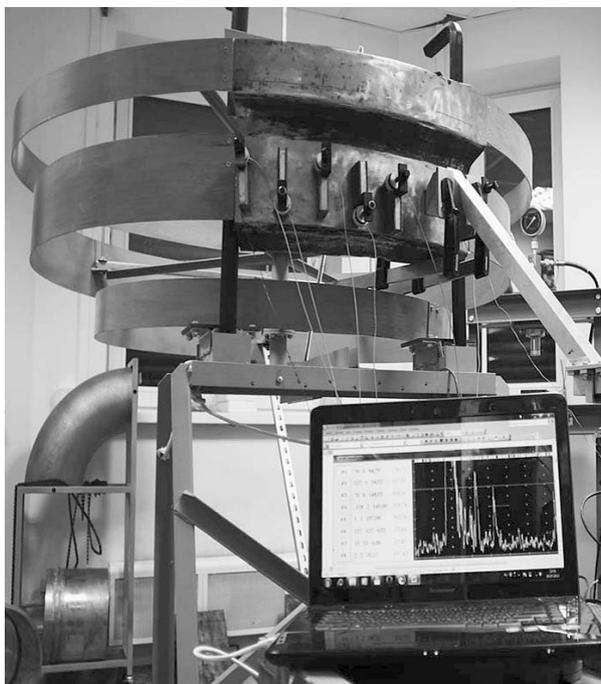


Рис. 2. Полномасштабный стенд для отладки схемы локализации сигналов АЭ в распределенной АЭ-системе на патрубке ПГ

3. С учетом реализации работ по пп. 1, 2 были проведены модельные расчеты по распространению импульсов АЭ от дефектообразования в зоне зарождения трещин, а также определены места расположения АЭ-датчиков и выбрана схема локации.

Правильное местоположение датчиков в значительной мере исключает получение ложных сигналов, появляющихся при многократном отражении волн от границ контролируемого объекта, приводящих к их трансформации, т.е. преобразованию одних типов волн в другие, например, продольных волн в поперечные, релеевские или нормальные [9]. На основании этого был предложен алгоритм отсека ложных сигналов применительно к сложной геометрии зоны контроля.

Третий этап работ был направлен на отладку работы системы в лабораторных условиях на полномасштабном стенде, проведение серии дополнительных экспериментов по анализу параметров АЭ-сигналов при упругопластическом деформировании и разрушении стали патрубка ПГ и уточнение схемы локации с учетом специфики контролируемой стали.

Четвертый этап включал в себя работы по составлению рабочей программы и специального регламента подготовки к проведению контроля ПГ методом АЭ. Регламент включает в себя конструкторско-технологическую документацию по сборке и наладке системы непосредственно на АЭС, организацию сбора и передачи данных АЭ-контроля. В рабочей программе определены обязанности участников, перечень организационных и технических мероприятий, необходимых для выполнения контроля, в том числе по методологическому и техническому обеспечению. Разработанная и утвержденная программа является основным документом для проведения работ на АЭС.

Следует отметить, что результаты контроля после экспресс-обработки периодически на протяжении всего времени эксплуатации энергоблока передаются в виде промежуточных отчетов на АЭС. В конце работы выпускается итоговый отчет по результатам контроля за год. Отчет включает в себя результаты экспертного ультразвукового контроля со 100%-ным охватом зоны СС №111 с целью сравнения с данными УЗК, проведенного за год до этого. Полученные данные сопоставляются, определяются новые дефекты, которые сравниваются с результатами АЭ-контроля.

На начальном этапе наиболее сложной оказалась работа по подбору чувствительных высокотемпературных первичных преобразователей для регистрации АЭ-сигналов и обеспечению надежного контакта АЭ-преобразователя с поверхностью объекта контроля. Для преобразования упругих волн в электрические сигналы используются различные типы АЭ-преобразователей [10]. Наиболее широкое распространение получили датчики на основе пьезоэффекта (пьезоэлементы). Применительно к работе была выбрана керамика для контрольного преобразователя на основе цирконата-титаната свинца (ЦТС) с высокой точкой Кюри +400 °С [11]. Эта керамика сохраняет рабочие характеристики при температурных режимах первого контура ВВЭР-1000 и устойчива к нейтронному и гамма-излучению. С целью повышения достоверности, информативности и помехоустойчивости в рамках данной работы был разработан преобразователь, состоящий из множества тонких однонаправленных пьезокристаллов [12].

На основе этой керамики были изготовлены несколько вариантов датчиков АЭ-сигналов резонансного типа. Размеры пьезоэлементов выбирались таким образом, чтобы их резонансные частоты находились в области частот, где существуют оптимальные условия приема сигналов по обеспечению наибольшего отношения сигнал/шум. С целью снижения влияния высокой температуры поверхности в экспериментах использовались звуководы (волноводы); их размеры выбирались из условия, чтобы диапазон частот регистрации контролируемых сигналов находился как можно выше нижней резонансной частоты звуководы [6]. Были использованы волноводы двух типов: цилиндрические и с конусной частью. Для всех волноводов были проведены испытания по определению коэффициентов затухания. Контрольные испытания проводились как на образцах, так и

на полномасштабном стенде (см. рис. 2).

АЭ-датчики устанавливались непосредственно на металл с предварительной зачисткой места контакта. Проведенные испытания показали удовлетворительные характеристики такой схемы установки датчиков – низший коэффициент затухания менее 10 дБ и приемлемое падение чувствительности при длительной эксплуатации при температуре 300 °С. Применительно к самим датчикам были проведены работы по подбору высокотемпературных контрольных кабелей и по абсолютной и относительной их градуировке (калибровке) [4]. Параметры регистрируемых сигналов зависят не только от амплитудно-частотной характеристики датчика, но и от способа его крепления к объекту контроля и передаточной функции всего акустического тракта, по которому регистрируется сигнал. По этой причине для повышения достоверности АЭ-измерений окончательная градуировка датчиков проводилась непосредственно на полномасштабном стенде. С целью выбора схемы локации в зоне контроля были проведены работы по оценке максимально допустимых расстояний между АЭ-датчиками и определению коэффициента затухания в патрубковой зоне.

Максимально допустимое расстояние между датчиками локационной группы не должно превышать величину, при которой затухание мгновенной амплитуды излучаемых АЭ-сигналов в процессе распространения от одного датчика к другому не позволяет однозначно идентифицировать АЭ-сигнал на фоне общих шумов. Исходя из этого сначала была проведена расчетно-экспериментальная работа по выбору оптимального расстояния между датчиками, оптимальной локационной схемы с учетом геометрии зоны СС №111 и ожидаемого места образования и развития дефекта. В этой части работы в качестве контрольного импульса АЭ-сигнала применялся источник Су-Нильсена, который обычно используется для абсолютной градуировки АЭ-преобразователей. По измеренным пиковым амплитудам зарегистрированных сигналов со всех датчиков акустической системы рассчитывался коэффициент затухания первой и второй мод и всего АЭ-сигнала в целом.

Так как метод АЭ основан не только на локации источника сигнала, но и на анализе информационных параметров волн от него, необходимо было разобраться с особенностями АЭ-импульсов, излучаемых металлом зоны СС №111 при дефектообразовании. Важно также определить, как будут меняться АЭ-импульсы, характеризующиеся амплитудой, длительностью, формой, частотным спектром при упругопластическом деформировании и разрушении парогенераторной стали, с учетом расстояния между источником и приемником упругих волн.

С этой целью был проведен ряд лабораторных экспериментов по сепарации АЭ-сигналов с использованием методов локации при испытаниях крупногабаритных образцов специальной формы на одноосное растяжение.

В процессе таких испытаний определяются параметры АЭ-сигналов, характерные для процессов упругопластической деформации, начала зарождения и раскрытия трещины вплоть до полного разрушения.

На рисунке 3 представлены графики интенсивности АЭ-сигналов в зависимости от времени с наложением параметра нагрузки и график распределения числа сигналов по амплитудам на всех этапах испытания образца. Параметры АЭ-сигналов для кластеров из рабочей зоны образца выделены светлым тоном, из зоны захватов – темным. Проведенный анализ амплитудно-частотных характеристик сигналов для разных этапов деформации и разрушения образца показал, что длительность актов акустического излучения составляет $(0,1-0,9) \cdot 10^{-6}$ с, со средней энергией порядка $10^{-14} - 10^{-15}$ Дж, амплитудой от 30 до 50 дБ, спектр сигналов соответствует дислокационным механизмам [14]. Однако прием частот ниже 100 кГц ограничивается

механическими шумами, а в частотном диапазоне 1 МГц затухание ультразвуковых волн в металле существенно уменьшает амплитуду импульсов.

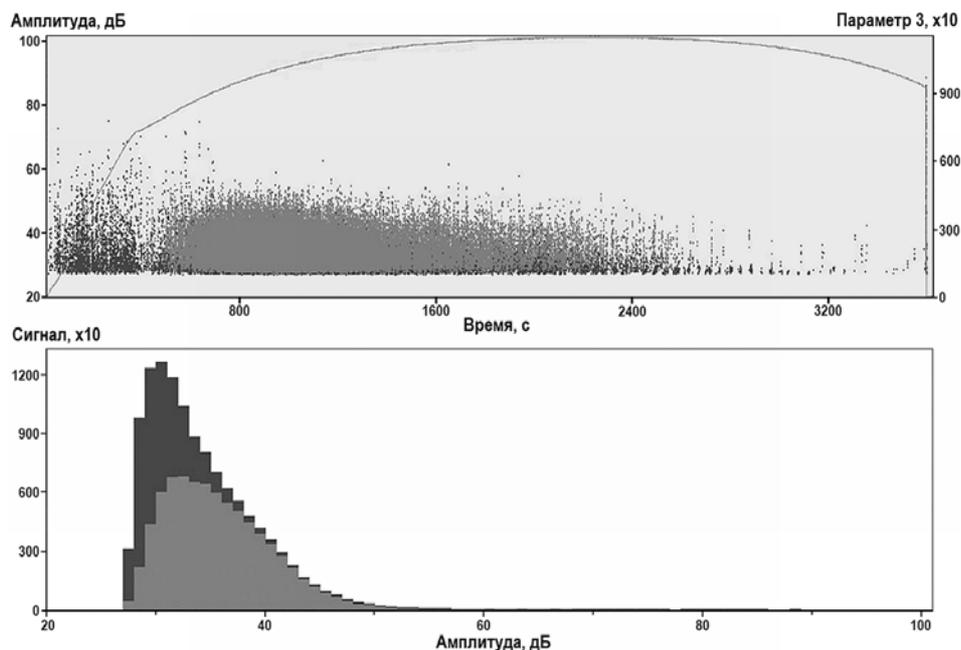


Рис. 3. Графики интенсивности (сверху) и распределения амплитуд (снизу) для АЭ-сигналов из рабочей зоны (светлый тон) и зоны захватов (темный тон)

В этой связи исследование процессов деформирования и разрушения конструкционных сталей целесообразно проводить в диапазоне 100 – 300 кГц. Акустические сигналы из зоны образования шейки с начальной микротрещиной и последующего ее роста вплоть до разрыва образца имеют большую длительность с ярко выраженной модой по сравнению с участком пластической деформации. Этот факт позволяет создать программу фильтрации для начальной отбраковки АЭ-сигналов и тем самым упростить анализ локационной картины. После проведения локации наилучшим критерием для ранжирования потенциально опасных зон с развивающейся дефектностью является плотность АЭ-сигналов по площади образца.

На основании полученных АЭ-данных, согласно литературным источникам [5, 6, 15 – 17], можно оценить динамику роста трещин. Однако это довольно непростая задача, а с учетом шумов при работе оборудования первого контура, на наш взгляд, невыполнимая, поэтому в рамках данной работы она не рассматривалась [18].

Основное назначение разработанной распределенной системы – сбор информации с преобразователей по выбранной на стенде схеме их расположения под наиболее потенциально опасным дефектом в зоне СС №111.

Каждый измерительный канал имеет свой АЦП и сигнальный процессор; при этом исключается коммутация и паразитное влияние каналов друг на друга. Такая конфигурация позволяет производить предварительную обработку сигналов, фильтрацию помех, вычислять спектр и регистрировать абсолютное время прихода, длительность и другие важные для локации характеристики. Причем расчет этих характеристик производится в темпе проведения эксперимента. Использование в каждом канале встроенного имитатора сигналов АЭ позволяет автоматически определять размеры зон локации и качество установки датчиков на

сложной геометрии патрубка ПГ. Использование разработанной системы вышеописанной архитектуры дает возможность проводить контроль патрубка ПГ по всему периметру СС №111.

Литература

1. Бакиров М.Б. и др. Акустико-эмиссионная диагностика АЭС. Учебное пособие для вузов. – М.: РАДЭКОН. 2003.
2. Неразрушающий контроль. Справочник. Том 7. – М.: Машиностроение. 2006.
3. Improvement of inservice inspection in nuclear power plants. IAEA TECDOC - 1400. 2004.
4. Баранов В.М. Акустические измерения в ядерной энергетике. – М.: Энерготамиздат 1990.
5. Артюхов В.И., Вакар К.Б., Макаров В.И. и др. / Под ред. К.В. Вакара Акустическая эмиссия и ее применение для неразрушающего контроля в ядерной энергетике. – М.: Атомиздат. 1980.
6. Баранов В.М., Молодцов К.И. Акустико-эмиссионные приборы ядерной энергетике. – М.: Атомиздат. 1980.
7. Лукасевич Б.И., Трунов Н.Б. Парогенераторы реакторных установок ВВЭР для атомных станций. – М.: Академкнига. 2004.
8. Elaboration and application into practice of intelligent system of damage of NPP main equipment in the frames of PLUM Plim & Plex Europe Wednesday 18th – Thursday 19th April 2012, Nusa President Park Hotel, Brussels, Belgium.
9. Дьелесан Э., Руаье Д. Упругие волны в твердых телах. Применение для обработки сигналов. / Пер. с фр. под ред. В.В. Леманова. – М.: Мир. 1982.
10. Ультразвуковые преобразователи для неразрушающего контроля / Под общ. ред. И.Н. Ермолова. – М.: Машиностроение. 1986.
11. Козинкина А.И. и др. Пьезоэлектрический преобразователь для приема сигналов акустической эмиссии. Российская федерация. Патент №1784095. Кл. G01 №29/04 от 23.12.1992.
12. Трипалин А.С., Шихман В.М. Применение пьезополупроводниковых материалов на основе халькогенгалогенидов сурьмы в качестве активных элементов преобразователей. Акустическая эмиссия материалов и конструкций / Тез. докл. Всесоюзной конференции. Ростов-на-Дону. 1984.
13. О повышении достоверности измерения амплитуды акустического сигнала при высокотемпературном неразрушающем контроле / Тез. докл. IX Всесоюзной научно-технической конференции «Неразрушающие физические методы и средства контроля». Минск. 1981.
14. Баранов В.М. и др. Акустическая диагностика и контроль на предприятиях топливно-энергетического комплекса. – М.: Наука 1998.
15. Баранов В.М. Акустическая эмиссия при деформировании монокристаллов тугоплавких металлов. – М.: Наука. 1982.
16. Дробот Ю.Б., Лазарев А.М. Неразрушающий контроль усталостных трещин акустико-эмиссионным методом. – М.: Издательство стандартов. 1987.
17. Стрижало В.А., Добровольский Ю.В., Стрельченко В.А., Пичкова С.Н., Данилина В.В. Прочность и акустическая эмиссия материалов и элементов конструкций. – Киев: Наукова думка. 1991.
18. Бигус Г.А., Бородин Ю.П., Травкин А.А. Исследование процессов усталости с помощью метода акустической эмиссии // Мир НК. 2013. №1(59). - С. 17, 18.

Поступила в редакцию 11.12.2013 г.

Авторы

Бакиров Мурат Баязитович, Генеральный директор ООО «НСУЦ «ЦМиР»
E-mail: info@expresstest.ru

Левчук Василий Иванович, начальник лаборатории ООО «НСУЦ «ЦМиР»
E-mail: leavc@mail.ru

Поваров Владимир Петрович, заместитель генерального директора ОАО «Концерн Росэнергоатом», директор филиала «Нововоронежская атомная станция»
E-mail: PovarovVP@nvnpp1.rosenergoatom.ru

Громов Александр Федорович, начальник ОДМиТК филиала ОАО «Концерн Росэнергоатом» «Нововоронежская атомная станция»
E-mail: GromovAF@nvnpp1.rosenergoatom.ru

UDK 621.039

DEVELOPMENT OF TECHNOLOGY FOR CONTINUOUS ACOUSTIC-EMISSION MONITORING OF OPERATIONAL DAMAGEABILITY OF METAL IN SAFETY-RELATED NPP EQUIPMENT

Bakirov M.B. *, Povarov V.P. **, Gromov A.F. **, Levchuk V.I. *

* Center of material science and lifetime management, Ltd.

7 Kirov st., 5 office, Lyubertsy city, Moscow reg., 5140002 Russia.

** A branch of the Rosenergoatom Concern «Novovoronezh Nuclear Power Plant»
Novovoronezh city, Voronezh reg., 396071 Russia.

ABSTRACT

Safe operation of NPP primary equipment whose design service life has expired requires the development of new approaches in integrity diagnostics and monitoring due to high level of metal ageing.

These approaches should be based on nondestructive testing methods which make it possible to inspect the equipment not only during the repair period, but also under operating conditions, when the initiation and growth of dangerous defects occur. Among the modern methods of nondestructive testing, suitable for use in the operation period, the acoustic emission method demonstrates high efficiency. The article presents the results of work on the development of a multi-parameter system for acoustic emission monitoring of nuclear power plant equipment damageability during power unit operation with due account of specific features of NPP control. The stages of the work with the assessment of and taking into account all influencing factors on the system under development, i.e. the need to maintain the system performance in a long-term operation at high temperature, the complex geometry of the monitored item, increased noise level, as well as the requirements for collecting and transferring the monitoring information via the Internet for operational data processing and presentation are described. A series of experiments on the debugging of the system under laboratory conditions, conducted to refine and validate the selected control methods, are described as well.

Key words: nuclear power plant, acoustic emission, defect, cluster, location, monitoring, steam generator, damageability, transducer, weld joint, operation

REFERENCES

1. Bakirov M.B.. Akustiko-emissionnaya diagnostika AES. Uchebnoe posobie dlya vuzov. (Acoustic emission diagnostic of NPPs. A manual for universities). Moscow, RADEKON Publ. 2003 (in Russian).
2. Nerazrushayushhij kontrol'. Spravochnik (Nondestructive testing. A handbook), v. 7. Moscow, Mashinostroenie Publ. 2006 (in Russian).
3. Improvement of in-service inspection in nuclear power plants. IAEA TECDOC - 1400. 2004.
4. Baranov V.M. Akusticheskie izmereniya v yadernoj energetike (Acoustic Measurement in nuclear power engineering). Moscow, Energotamizdat Publ. 1990 (in Russian).
5. Artyuhov V.I., Vakar K.B., Makarov V.I. Akusticheskaya emissiya i ee primeneniye dlya nerazrushayushhego kontrolya v yadernoj energetike (Acoustic emission and its application for nondestructive testing in nuclear power engineering), Vakar K.V., Ed. Moscow, Atomizdat

Publ. 1980 (in Russian).

6. Baranov V.M., Molodcov K.I. Akustiko-emissionnye pribory yadernoj energetiki (Acoustic emission instruments for nuclear power engineering). Moscow, Atomizdat, 1980 (in Russian).
7. Lukasevich B.I., Trunov N.B. Parogeneratory reaktornyh ustanovok VVER dlya atomnyh stancij (Steam generators for VVER nuclear power plants). Moscow, Akademkniga Publ. 2004 (in Russian).
8. Elaboration and application into practice of intelligent system of damage of NPP main equipment in the frames of PLUM Plim & Plex Europe Wednesday 18th – Thursday 19th April 2012, Huisa President Park Hotel, Brussels, Belgium.
9. Dieulesaint E., Royer D. Ondes elastiques dans les solides, Paris, Ed. Masson, 1974 (Russian edition: Uprugie volny v tverdyh telah. Moscow, Nauka Publ. 1982).
10. Ul'trazvukovye preobrazovateli dlya nerazrushayushchego kontrolya (Ultrasound transducers for nondestructive testing), Ermolov I.N., Ed. Moscow, Mashinostroenie Publ. 1986 (in Russian).
11. Kozinkina A.I., Tripalin A.S., Shihman V.M. P'ezoelektricheskij preobrazovatel' dlya priema signalov akusticheskoy emissii (Piezoelectric transducers for acoustic emission signal perception). The Soviet Union, Patent, №1784095, Kl. G01 №29/04 ot 23.12.1992.
12. Tripalin A.S., Shihman V.M. Primenenie p'ezopoluprovodnikovyh materialov na osnove hal'kotengalogenidov sur'my v kachestve aktivnyh elementov preobrazovatelej. Akusticheskaya emissiya materialov i konstrukcij. Tezisy dokladov vsesoyuznoj konferencii (The application of piezosemiconductor materials on the basis of antimony chalcogenhalogenides as transducers' active elements. Proceeding of the all-USSR conference «Acoustic emission of materials and constructions»). Rostov-on-Don, 1984 (in Russian).
13. O povyshenii dostovernosti izmereniya amplitudy akusticheskogo signala pri vysokotemperaturnom nerazrushayushchem kontrole. Tez. dokl. 9-j Vsesoyuznoj nauchno-tehnicheskoy konferencii «Nerazrushayushchie fizicheskie metody i sredstva kontrolya» (Improving the reliability of acoustic signal amplitude measurement at high temperature nondestructive testing. Proceeding of the all-USSR conference «Nondestructive physical methods and instruments of testing»). Minsk, 1981 (in Russian).
14. Baranov, V.M., Gritsenko, A.I., Karasevich, A.M., et al., Akusticheskaya diagnostika i kontrol' na predpriyatiyakh toplivno-energeticheskogo kompleksa (Acoustic diagnostics and tests at fuel-processing and power generating facilities). Moscow, Nauka Publ. 1998 (in Russian).
15. Gusev O.V. Akusticheskaya emissiya pri deformirovanii monokristallov tugoplavkikh metallov (Acoustic emission under Conditions of Deformation of Single Crystals of High-Melting Metals). Moscow, Nauka Publ. 1982 (in Russian).
16. Drobot Yu.B., Lazarev A.M. Nerazrushayushchij kontrol' ustalostnyh treshchin akustiko-emissionnym metodom (Nondestructive testing of fatigue cracks by acoustic emission method). Moscow, Izdatel'stvo standartov Publ. 1987. (in Russian)
17. Strizhalo V.A., Dobrovol'skij Yu.V., Strel'chenko V.A., Pichkova S.N., Danilina V.V. Prochnost' i akusticheskaya emissiya materialov i elementov konstruktsii (Strength and acoustic emission of materials and structure elements). Kiev, Naukova Dumka Publ. 1990 (in Russian).
18. Bigus G.A., Borodin Yu.P., Travkin A.A. Issledovanie processov ustalosti s pomoshh'yu metoda akusticheskoy emissii (Research of fatigue process by acoustic emission method). Moscow, Mir NK, 2013, no. 1(59), pp. 17-18. (in Russian)

Authors

Bakirov Murat Bayazitovich, Director General of the Center of Material Science and Lifetime Management
E-mail: info@expresstest.ru

Levchuk Vasilij Ivanovich, Laboratory Chief of the Center of Material Science and Lifetime Management
E-mail: leavc@mail.ru

Povarov Vladimir Petrovich, Deputy General Director of the Joint Stock Company «Concern Rosenergoatom», Director of the branch «Novovoronezh Nuclear Power Plant»
E-mail: PovarovVP@nvnpp1.rosenergoatom.ru

Gromov Aleksandr Fedorovich, Chief of Division of the Joint Stock Company «Concern Rosenergoatom»'s Branch «Novovoronezh Nuclear Power Plant»,
E-mail: GromovAF@nvnpp1.rosenergoatom.ru