

На правах рукописи

УДК 621.791.052.08

Стрелков Петр Борисович

**РАЗРАБОТКА МЕТОДИКИ АКУСТИКО-ЭМИССИОННОГО
КОНТРОЛЯ ОБОРУДОВАНИЯ И ТРУБОПРОВОДОВ
АТОМНЫХ ЭЛЕКТРОСТАНЦИЙ**

**Специальность 05.02.11.- Методы контроля и диагностика
в машиностроении**

**Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук**

Стрелков

Москва – 2006

Работа выполнена в Московском государственном техническом университете имени Н.Э. Баумана

Научный руководитель – доктор технических наук

Бигус Георгий Аркадьевич

Официальные оппоненты - доктор технических наук

Барзов Александр Александрович

Ведущая организ

У1765689 ук		
Стрелков П.Б.		
Разработка методики		
акустико-эмиссионного		
контроля оборудования и		
трубопроводов атомных эл...		
2006 0-00		

ич
кий и конструкторский

А.А. Доллежала

Защита состоит
вета Д212.141.01

иссертационного со-
у:

У1765689

ОСИМ ВЫСЛАТЬ

ВОЗВРАТИТЕ КНИГУ НЕ ПОЗЖЕ
обозначенного здесь срока

МГТУ им.

НТБ МГТУ им. Н.Э. Баумана



1765689

Стрелков П. Б. Разработка м

овалов А.В.

10 экз.

Н.Э. Баумана

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы вызвана тем, что длительная эксплуатация оборудования реактора большой мощности канального (РБМК) приводит к значительной трудоемкости выполнения регламентных работ по оценке фактического состояния металла и сварных соединений неразрушающими методами контроля. Увеличение радиационной загрязненности оборудования приводит к существенному увеличению доз, получаемых персоналом при проведении регламентных работ. Одним из способов, позволяющих уменьшить время неразрушающего контроля оборудования, может служить комбинированное использование метода акустической эмиссии с последующим контролем выявленных зон традиционными методами неразрушающего контроля.

Целью работы является предупреждение возникновения и развития критических ситуаций на оборудовании контура многократной принудительной циркуляции (КМПЦ).

Объектом исследований данной работы являются элементы оборудования КМПЦ.

Методы исследования. Для достижения поставленной цели использовались теоретические и экспериментальные исследования акустических сигналов, возникающих в материале оборудования КМПЦ, с применением современной вычислительной техники; статистические методы обработки сигналов: спектральный и корреляционный анализ.

Научная новизна работы.

1. Экспериментально показана возможность использования корреляционной матрицы в качестве информативного признака АЭ сигнала. Нормированный «объем» корреляционной матрицы является определяющим фактором наличия АЭ излучения от дефектов на фоне шумоподобных акустических сигналов оборудования.

2. На основе анализа функции когерентности, принимаемых акустических сигналов, определен оптимальный частотный диапазон огибающей сигнала, который с высокой эффективностью позволяет выделить АЭ сигнал от дефекта на фоне шумов оборудования.

3. Экспериментально установлено, что коэффициент Ω , равный отношению частоты, на которой наблюдается нормированный максимум в спектре, к ширине спектра, где отмечаются ослабления амплитуды до величины 0,4, будет существенно отличаться для сигналов АЭ, характерных для процесса образования локальной пластической деформации ($\Omega \approx 2$), и сигналов АЭ, характерных для развития трещины ($\Omega \approx 8-10$). Этот коэффициент может служить отличительной особенностью развития трещины

Практическая ценность работы

1. Разработана методика акустико-эмиссионного контроля элементов оборудования КМПЦ РБМК-1000.

2. Разработанная диагностическая система сбора данных акустической эмиссии передана в дальнейшее опытное применение в Концерн «Росэнергоатом».

3. Разработанное программное обеспечение постобработки данных акустической эмиссии позволяет выявлять развивающиеся дефекты при наличии посторонних шумов.

Практическая значимость диссертации заключается в том, что результаты и полученные акустико-эмиссионные характеристики основных материалов и сварных швов позволили ориентировать систему технической диагностики элементов оборудования и трубопроводов КМПЦ на обнаружение методом АЭ наиболее опасных, часто встречающихся дефектов, плохо выявляемых другими методами.

Реализация научных результатов диссертации.

Результаты диссертационных исследований реализованы в Научно-исследовательских работах:

1. «Исследование связи параметров акустико-эмиссионной активности образцов из стали 22К с характеристиками их разрушения при статическом и квазистатическом разрушении»

2. «Исследование распространения упругих волн в металле контролируемого оборудования контура КМПЦ: барабан-сепаратора, напорного и всасывающего коллекторов и трубопроводов Ду800»

3. «Исследование корреляционных характеристик акустико-эмиссионных шумов, генерируемых ростом трещины в металле оборудования при нагружении его давлением и фоновых шумов работы оборудования»

На основании диссертационной работы разработано и утверждено «Техническое задание на разработку методики дефектности сварных соединений методом акустической эмиссии» №840.118 ТЗ

Апробация работы и публикации. Основные результаты работы опубликованы в 5 научно-технических публикациях, 4 отчетах по НИР, 6 трудах Международных и Российских конференций.

Структура и объем работы. Полный объем диссертации составляет 163 страницы текста, содержит: введение, 5 глав, выводы к работе, 82 рисунка, 11 таблиц, список использованной литературы, включающий 78 наименований, и приложение.

КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы диссертации, определена цель исследования, сформулированы основные результаты, выносимые на защиту, дана общая характеристика работы и приводятся результаты апробации диссертационной работы.

Первая глава посвящена постановке задачи исследования. В ней дана краткая характеристика объектов исследования и требования к ним,

проанализированы существующие в настоящее время методики контроля традиционными методами неразрушающего контроля.

В работе рассматриваются элементы оборудования КМПЦ реактора типа РБМК-1000. Некоторые реакторы этого типа эксплуатируются более 25 лет.

В качестве объекта контроля было выбрано оборудование и трубопроводы КМПЦ: барабан-сепараторы, напорные и всасывающие коллекторы, а также трубопроводы Ду 800. КМПЦ является первым контуром реактора.

Для указанного оборудования контура был проведен анализ методов неразрушающего контроля, который показал следующее:

1. Все оборудование контура обследуется традиционными методами неразрушающего контроля (визуальным, ультразвуковым, капиллярным, магнитопорошковым и др.) 1 раз в 4 года в объеме 100%.

2. Гидроиспытание контура проводят 1 раз в 2 года.

Длительное время эксплуатации приводит к получению значительных накопленных доз излучения дефектоскопистами при визуальном, ультразвуковом, магнитопорошковом и других видах неразрушающего контроля. При этом ужесточающиеся требования к эксплуатации АЭС требуют сохранять объемы контроля. Однако, как показывает опыт, число дефектных мест составляет порядка нескольких процентов от всего объема контролируемого оборудования.

Таким образом, необходимо выявлять и контролировать только зоны, в которых есть дефекты. Единственным способом провести 100% контроль оборудования в короткий промежуток времени с ограниченным временем пребывания дефектоскописта в опасной зоне и при этом выявить дефектные места оборудования является использование метода акустической эмиссии.

Большим преимуществом метода АЭ, как неразрушающего метода контроля, является то, что наряду с высокой чувствительностью он позволяет контролировать объекты неподвижно расположенными датчиками – без сканирования. Также метод АЭ дает возможность контролировать изделия сложной геометрической формы, изготовленные как из однородных, так и неоднородных материалов разной толщины.

Практическое внедрение акустико-эмиссионного метода контроля, наряду с совершенствованием аппаратуры для регистрации акустической эмиссии, включает глубокое изучение АЭ свойств материалов под нагрузкой. Поэтому при разработке методики по акустико-эмиссионному диагностированию качества элементов оборудования и трубопроводов КМПЦ важное значение имеют исследования физики процессов эмиссии, изучение временного и пространственного распределения выделяющейся энергии, а также создание методик, позволяющих отличить АЭ, вызванную дефектами, от эмиссии в тех случаях, когда опасных изменений в ма-

териале нет. Для того, чтобы правильно оценить акустико-эмиссионные характеристики материалов и сварных соединений элементов оборудования и трубопроводов КМПЦ, необходимо изучить источники АЭ, по возможности учесть характеристики распространения ультразвуковых волн в среде, создать серию реально существующих дефектов и определить особенности их акустико-эмиссионных параметров.

В рамках данной работы метод акустической эмиссии, как метод неразрушающего контроля, должен быть адаптирован и сертифицирован применительно к трубопроводам и оборудованию КМПЦ реактора. Применение метода рассматривается только для расколоченного реактора в режиме опрессовки контура КМПЦ давлением. При этом в задачу метода АЭ входит локация зон металла оборудования и трубопроводов КМПЦ, где происходит выделение энергии в виде излучения волн упругих колебаний, вызванных зарождением и развитием усталостной трещины. В последующем выделенные зоны должны быть подвергнуты тщательному контролю другими методами неразрушающего контроля. Такой подход позволит при 100% контроле металла оборудования и трубопроводов КМПЦ уменьшить время контроля, соответственно снизить дозы, получаемые дефектоскопистами при контроле, и при этом повысить достоверность контроля.

Во второй главе проведен анализ дефектов оборудования и трубопроводов КМПЦ и анализ роста дефектов.

Проведенный анализ эффективности методик неразрушающего контроля дал следующие результаты:

1. Основными методами контроля для выявления поверхностных дефектов оборудования и трубопроводов КМПЦ РБМК являются методы визуального и капиллярного контроля. Для контроля дефектов в объеме сварного шва или основного металла используется, в основном, ультразвуковой контроль и, частично, рентгеновский контроль.

2. При ультразвуковом контроле барабан-сепаратора практически отсутствует доступ для контроля примерно 33% периметра всех кольцевых сварных швов. Около 50% продольных сварных швов имеют только односторонний доступ для контроля.

3. Установлено, что конструкция угловых сварных швов патрубков БС и коллекторов позволяет проводить ультразвуковой контроль аппаратурой по действующим методикам в некоторых случаях в объеме 16-46% от объема поперечного сечения сварного шва, при этом верхняя и средняя части шва остаются без контроля, и достоверность контроля является недостаточной.

Результаты экспертного ультразвукового голографического контроля сварных швов трубопроводов Ду800, выполненного на 1 и 3 блоках ЛАЭС с использованием голографической системы визуализации дефектов «Авгур 4.2» показали, что основным дефектом является трещина, распола-

гающаяся в корне шва. Более подробно соотношение дефектов по сечению шва представлены в таблице 1.

Таблица 1

Тип дефекта	Трещина в корне	Трещина в нижней части шва	Трещина в средней части шва	Объемные	Другие	Всего
Количество	56	10	6	9	9	90
	62%	11%	7%	10%	10%	100%

Основная масса дефектов возникает в монтажных замыкающих швах и внутриконтурных заделок (стыки «труба–патрубок коллектора», «труба–патрубок насоса», «труба–патрубок арматуры», «труба–тройник»).

В соединениях *трубы с трубой* дефекты в основном распределяются в корне шва, включая переходную зону от перлита к аустениту (мартенситная прослойка), в центральной части сварного соединения (перлит) и в верхней части сварного соединения.

В соединениях *трубы с патрубком коллектора* дефекты в основном распределяются в корне шва, в центральной и верхней частях сварного соединения и в зоне термического влияния.

В соединениях *трубы с патрубками* (всасывающим и напорным) ГЦН дефекты распределяются в корне шва, включая переходную зону от перлита к аустениту, в центральной части сварного соединения и в зоне термического влияния.

Таким образом, создать методику, которая для разных сварных соединений должна выявлять дефекты, затруднительно. Метод АЭ лишен требования к месту положения дефекта и его ориентации.

Определение допускаемых размеров дефектов (окружных и продольных) с использованием диаграммы конструкционной целостности (ДКЦ) проводится отдельно для каждого функционального сосуда давления одного размера (БС, ВК и НК) в следующей последовательности:

1. Идентифицируются однотипные кольцевые и продольные сварные соединения (СС), для которых определяются минимальные фактические свойства материалов СС (основного металла, металла шва и околошовной зоны).

2. В предположении отсутствия в крупногабаритных сосудах давления напряжений изгиба, из анализа условий нагружения в режиме нормальных условий эксплуатации (НУЭ), определяются общие мембранные напряжения в окружных и продольных СС от действия внутреннего давления, σ_m , и в плоскости перпендикулярной действию растягивающих напряжений определяется расчетный полуэллиптический поверхностный кольцевой и продольный дефекты.

3. Используя минимальные свойства металла СС данного типа и приложенное к СС напряжение σ_m , методами механики разрушения рассчитывается критическая длина сквозной трещины $2c_c$, и в координатах,

критическая глубина трещины от ее длины строится диаграмма разрушения трубы с постулируемой кольцевой и продольной трещиной для режима НУЭ: $(a_c, 2c_d) = f(\sigma_m)$.

4. Вводится коэффициент запаса 2,6 на общие мембранные напряжения, определяется расчетное напряжение $\sigma_{max} = 2,6\sigma_m$, и в тех же координатах строится диаграмма предельно допускаемых размеров дефектов при расчетной нагрузке: $(a_p, 2c_p) = f(2,6\sigma_m)$.

5. Вводятся дополнительные ограничения на допускаемые размеры дефекта по предельному состоянию так, чтобы длина дефекта не превышала 50% от критической длины сквозной трещины $2c_c$, рассчитанной при НУЭ, а его максимальная глубина была не более 2/3 от толщины стенки трубы t .

6. Определяется граничная область предельно допустимых дефектов $(a_d, 2c_d)$:

$$(a_d, 2c_d) = \min(a_p, 2c_p) \text{ и } a_d < 0,67t, 2c_d < 0,5 \times 2c_c$$

Размеры дефектов, которые могут привести к разрушениям БС, НК, ВК и трубопроводов Ду800, при действующих испытательных давлениях, составляют сотни мм и не наблюдаются при периодическом контроле этих объектов.

В качестве основных проблем ближайшего будущего следует ожидать появление небольших по размерам (длине) дефектов, которые выйдут на поверхность и приведут к утечке. Наблюдались дефекты, составляющие 15÷20 мм по высоте и до 50 мм в длину.

Третья глава посвящена исследованию АЭ характеристик материала, из которого изготовлено оборудование контура, а также проведению экспериментов по исследованию распространения упругих волн по объекту контроля.

Экспериментальные исследования акустико-эмиссионных свойств стали 22К проводились при одноосном растяжении образцов. Условия нагружения выбирались из учета возможности воспроизведения идентичных условий деформации на большом числе образцов стали 22К различной технологической обработки. Кроме того, такое напряжение близко к условиям равноосного напряжения в сферических и цилиндрических емкостях.

При наличии сварных дефектов (особенно опасных трещиноподобных) в объектах растягивающие напряжения, возникающие в оборудовании КМПЦ за счет внутреннего давления, оказывают практически такое же воздействие на дефект, как и в случае одноосного растяжения дефектного образца на разрывной машине.

Образец под действием квазистатической нагрузки нагружался до уровня напряжений σ , равных пределу упругости. Скорость деформации $\dot{\epsilon} \sim 10^{-4} \text{ см}^{-1}$. В зоне упрочнения скорость деформации определялась свойствами материала.

Полученные АЭ данные представляли собой массив данных, которые были записаны АЭ системой в течение 34 минут проведения эксперимента по разрыву одного образца.

Количество событий, зарегистрированных АЭ системой, как правило, превышало 200 тысяч единиц. Обработать такой массив без фильтров сложно. Поэтому по окончании эксперимента (сбора данных) проводили необходимую фильтрацию.

Разрушение образца происходило за 3–4 подрастания трещины на увеличивающиеся интервалы Δl , равные нескольким мм.

При проведении экспериментов на образцах были получены следующие результаты:

1. Процесс пластической деформации (рис. 1) сопровождался регистрацией сигналов АЭ большой длительности (τ более 1000 мкс).

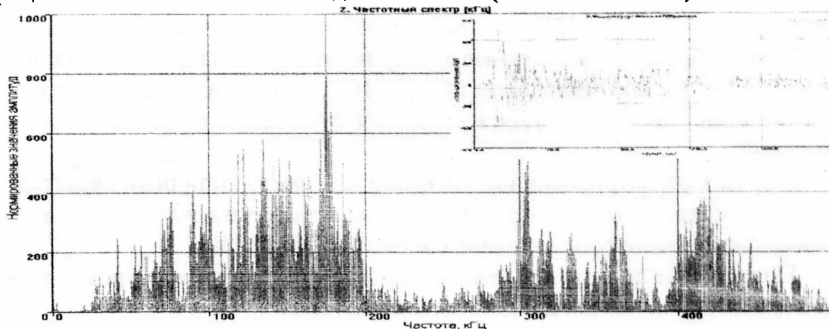


Рис. 1 Частотный спектр и форма сигнала характерные для пластической деформации.

2. При образовании и первичном подрастании трещины (рис. 2) регистрировались сигналы с меньшей длительностью ($\tau \approx 100$ –300 мкс), чем при пластической деформации в локальной зоне, но с большей амплитудой и энергией сигналов.

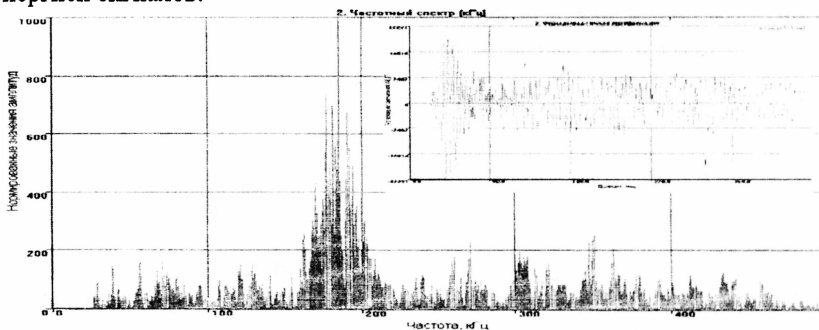


Рис. 2 Частотный спектр и форма сигнала характерные для зарождения и роста трещины.

3. Введенный коэффициент Ω , равный отношению частоты, на которой наблюдается максимум в спектре, к ширине спектра, где отмечаются ослабления амплитуды до величины 0.4, будет существенно отличаться для пластической деформации ($\Omega \approx 2$) и для развития трещины ($\Omega \approx 8-10$). Этот коэффициент может служить отличительной особенностью развития трещины.

4. Появление сигналов АЭ с высокой энергией ($80 \div 105 \cdot 10^{-15}$) Дж., зарегистрированных двумя и более датчиками, удовлетворяющих заранее установленным задержкам времени, характерным для зоны контроля и фиксированных расстояний между датчиками, имеющих спектральные и корреляционные характеристики Ω и $\rho_{xy}(\tau)$ выше, чем аналогичные характеристики АЭ источников, обусловлено локальными зонами пластической деформации и свидетельствует об образовании и развитии трещины в материале.

Таким образом, проведенные эксперименты показали, что для данного металла (22 К с плакировкой из 08Х18Н10Т) энергия излучения достаточно высокая ($80 \div 105 \cdot 10^{-15}$) Дж и стабильно отмечалась во всех сериях испытаний.

Форма зарегистрированных сигналов АЭ, имела типичный характер. При этом спектр сигнала, как правило, лежал в диапазоне 50÷500 кГц, а максимальные амплитуды сигналов составляли 75÷80 дБ.

Полученные данные продемонстрировали достаточность уровня сигналов АЭ для применения данного метода на АЭС.

В качестве объекта для проведения экспериментов по изучению распространения упругих волн был выбран БС КМПЦ РБМК. БС располагался на 5-ом (строящемся) блоке Курской АЭС.

В процессе экспериментов измерялись и устанавливались следующие параметры сигнала различных источников АЭ:

- измерение скорости распространения и затухания волн;
- наличие мертвых зон;
- проведение линейной локации;
- проведение плоскостной локации.

Определение основных параметров было проведено более чем в 30 экспериментах. Их результаты записаны в 32 файлах и обработаны непосредственно при натурных испытаниях на БС.

По результатам экспериментов были получены следующие результаты:

1. При определении координаты источника АЭ на объектах с установленными расстояниями между ПАЭ более 3 м, целесообразно выбирать скорость распространения волны близкую к 3000 м/с. К таким объектам можно отнести трубопроводы Ду800. При использовании локационных антенн с расстоянием между ПАЭ 1,5÷3 м на объектах сложной конструкции,

таких как БС, скорость распространения ультразвуковых волн целесообразно выбирать в диапазоне 5200-5600 м/с.

2. Максимальное значение коэффициента затухания в экспериментах составило 7 дБ/м, что позволяет разнести ПАЭ на расстояние в 3м.

3. Для патрубков подводящих и опускных трубопроводов диаметром 100 мм и менее возможно обнаружение источников излучения, если ПАЭ находится в зоне акустической тени, т.е. на прямой, соединяющей излучатель и приемник непосредственно за препятствием.

4. По результатам локаций можно рекомендовать к использованию планарную локацию для определения координат источника АЭ. При планарной локации количество ложных срабатываний будет минимальным, а погрешность определения координат не будет превышать 5%.

На основе полученных данных по значениям скоростей затухания была разработана схема расстановки ПАЭ на барабан-сепараторе (рис. 3).

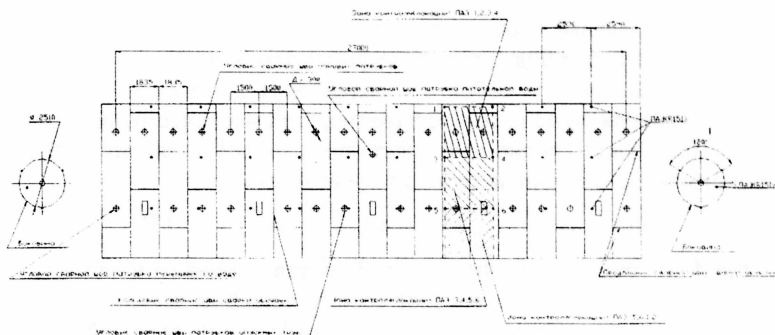


Рис. 3 Схема расстановки ПАЭ на барабан-сепараторе.

В четвертой главе приведен алгоритм обработки шумоподобного сигнала АЭ.

В настоящее время при анализе результатов АЭ контроля используют амплитудный метод.

При этом подразумевается, что появление сигнала АЭ приведет к повышению величины СПМ Δf . При такой реализации метода необходимо выполнение условия вида:

$$G_{\Delta f_{\text{АЭ}}} \gg G_{\Delta f_{\text{эл}}} + G_{\Delta f_{\text{ф}}} + G_{\Delta f_{\text{эм}}} \quad (1)$$

где $G_{\Delta f_{\text{АЭ}}}$ – величина СПМ шумоподобных сигналов, генерируемых АЭ, $G_{\Delta f_{\text{эл}}}$ – величина СПМ электронных шумов, генерируемых входными каскадами аппаратуры, $G_{\Delta f_{\text{эм}}}$ – величина СПМ электромагнитных шумов, $G_{\Delta f_{\text{ф}}}$ – величина СПМ фоновых шумов, генерируемых оборудованием реактора в процессе эксплуатации.

В настоящее время единственным решением в задачах идентификации источников, в значительной степени снижающим влияние посторон-

них шумов, является метод корреляционной обработки сигналов от нескольких разнесенных по контролируемой поверхности приемных датчиков. Обработка сигналов производится в соответствии с уравнением:

$$R_{xy}(\tau) = \frac{1}{T} \int_{-T}^{+T} x(t) \cdot y(t + \Delta\tau) d\tau, \quad (2)$$

где R_{xy} – корреляционная функция сигналов $x(t)$ и $y(t + \Delta\tau)$, принятых различными датчиками; T – период измерения АЭ сигналов; t – текущее время; $\Delta\tau$ – временной сдвиг.

Экспериментально показано, что спектр АЭ сигнала простирается от единиц килогерц (~1 кГц) до Меггерц (~1 МГц) и носит сложный характер (рис. 1, рис. 2).

Для длин волн больше линейного размера трещины и соответствующих частот источник типа «монополь» будет наиболее полно отвечать своим характеристикам. В данном случае рабочим диапазоном можно принять диапазон – 50÷300 кГц.

Все спектральные плотности мощности дискретных составляющих этого диапазона частот будут также следовать закону $U_i(t)$ и, соответственно, будут синфазны между собой. Т.е. для данного источника осцилляции суммарного уровня шума и, соответственно, его высокочастотных составляющих (100÷500 кГц) полностью будут определяться по закону $U_i(t)$, поэтому взаимокорреляционная функция будет иметь вид:

$$R(\Delta A_{f_1}; \Delta A_{f_2}) = \frac{1}{2T} \int \Delta A_{f_1}(t) \Delta A_{f_2}(t + \tau) d\tau, \quad (3)$$

где ΔA_{f_1} – осцилляция спектральной составляющей на частоте f_1 ;

ΔA_{f_2} – осцилляция спектральной составляющей на частоте f_2 ;

$2T$ – интервал записи одной выборочной функции, который будет иметь максимальное значение при $\tau=0$.

Можно предположить для «белого шума» (тепловой шум электронных элементов и т.д.) данная функция будет близка к нулю («0») для всех возможных значений частот при условии, что $f_1 \neq f_2$.

Соответственно, если для диапазона частот (100÷300 кГц) рассматривать корреляционную матрицу вида:

$$F(\tau) = \begin{pmatrix} F_1'(\tau)F_2'(\tau) & \dots & F_1'(\tau)F_m'(\tau) \\ F_2'(\tau)F_1'(\tau) & \dots & F_2'(\tau)F_m'(\tau) \\ \dots & \dots & \dots \\ F_n'(\tau)F_1'(\tau) & \dots & F_n'(\tau)F_m'(\tau) \end{pmatrix}, \quad (4)$$

где $F_1'(\tau) \dots F_n'(\tau)$ – функция осцилляции спектральной плотности мощности сигнала для дискретных частот от f_1 до f_n по первому каналу при определении взаимокорреляционной функции;

$F_1''(\tau) \dots F_m''(\tau)$ – функция осцилляции спектральной плотности мощности сигнала для дискретных частот от f_1 до f_m по второму каналу при определении взаимокорреляционной функции;

то матрица будет иметь максимальный объем для сигналов АЭ при $\tau=0$.

На рис. 4 и 5 приведены корреляционные матрицы для шумов оборудования и АЭ сигнала.

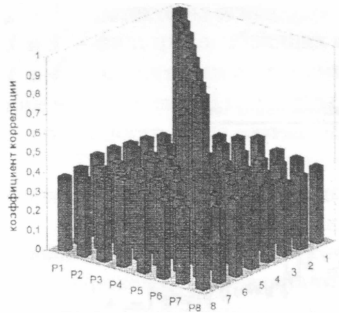


Рис. 4 Матрица шумов оборудования.

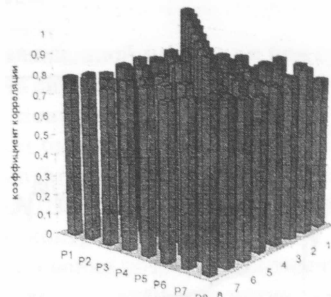


Рис. 5 Матрица АЭ сигнала.

Далее для определения местонахождения источника выделяется огибающая спектральной плотности мощности сигнала, и по осцилляции огибающей методом построения взаимнокорреляционной функции (ВКФ) определяется местонахождение источника АЭ.

Основными правилами построения ВКФ является:

- реализация должна обязательно носить центрированный характер;
- зависимость должна носить линейный характер.

Сигналы АЭ носят линейный характер, и требование линейности процесса выполняется.

Выполнение требований к центрированности процесса носит более сложный характер.

Для решения изложенных требований и установления такого оптимального диапазона частот с максимальным соотношением сигнал/шум, а также для определения частотного диапазона огибающей, обладающей минимальными искажениями при распространении по объекту, следует предварительно провести анализ формы нормированного взаимного спектра (функции когерентности) вида:

$$\hat{\gamma}_{xy}(f) = \frac{[\hat{G}_{xy}(f)]^2}{\hat{G}_x(f) \cdot \hat{G}_y(f)}, \quad (5)$$

где знак $\hat{}$ - означает самостоятельность оценки; $\hat{G}_{xy}(f)$ - взаимная спектральная плотность мощности процессов $x(t)$ и $y(t)$; $\hat{G}_x(f), \hat{G}_y(f)$ - спектральные плотности мощности соответственно процессов $x(t)$ и $y(t)$.

На рис. 6 показаны функции когерентности, как для эксплуатационных шумов, так и для сигналов АЭ. Когерентность для сигналов АЭ высо-

кая (составляет 0,5 и выше), в то время как для фоновых шумов когерентность близка к «0», в достаточном диапазоне частот.

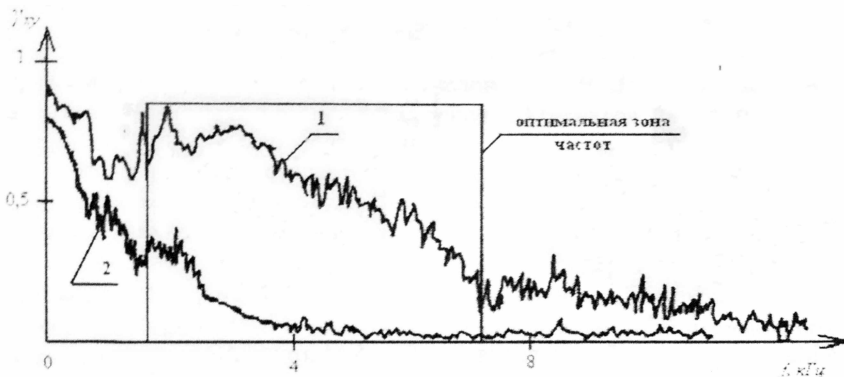


Рис. 6 Функция когерентности.
(1 – для сигналов АЭ, 2 – для фоновых шумов)

В результате проведенных исследований был разработан алгоритм обработки сигналов (рис. 7).

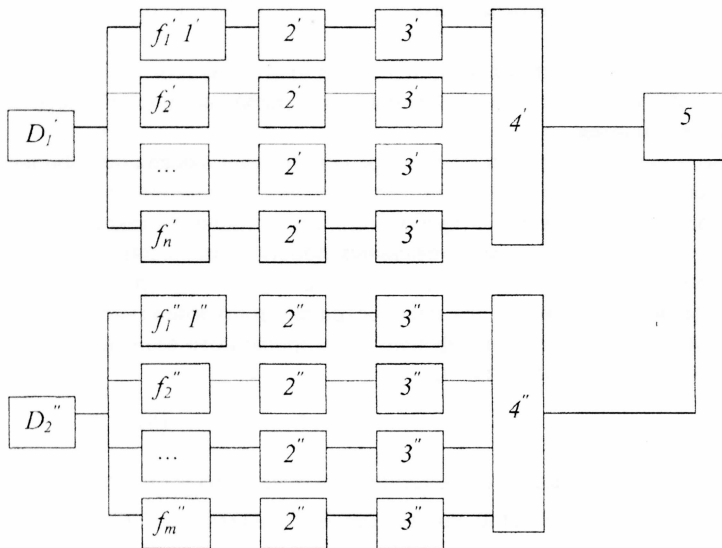


Рис. 7 Алгоритм обработки сигналов

где D_1' и D_2'' – датчики АЭ, разнесенные по контролируемому объекту;
 I_1' и I_1'' – полосовые фильтры дисперсных частот $f_1 \dots f_n \dots f_m$;
 $2'$ и $2''$ – детекторы огибающих сигналов;
 $3'$ и $3''$ – фильтры огибающих сигналов;
 $4'$ и $4''$ – блоки оценки «объема» корреляционной матрицы и при превышении установленной величины – выдача сигнала;
5 – блок построения взаимнокорреляционной функции.

Такой алгоритм обработки может быть реализован как в аналоговой форме аппаратно, так и в виде отдельной программы на компьютере.

Результатом работы такого алгоритма явилось повышение чувствительности метода АЭ и достоверности контроля.

Проведенные испытания и исследования позволили оптимизировать расстановку датчиков на барабан-сепараторе и провести натурные испытания.

В пятой главе приведены результаты испытаний разработанной методики на оборудовании Курской АЭС, а также приведены основные положения самой методики.

Для отработки методики использовалась зона контроля в центральной части БС, на которой были установлены 4 ПАЭ. Для оценки чувствительности и эффективности локации источника АЭ в реальных эксплуатационных условиях в зоне между преобразователями 1, 2, 3 и 4 был установлен излучатель – имитатор сигналов АЭ. Данный имитатор воспроизводил сигнал АЭ подобный тому, который был получен при испытаниях на стенде в МГТУ им. Н.Э. Баумана, т.е. моделировалась реальная форма, спектр и амплитуда сигнала АЭ.

В процессе нагружения БС внутренним давлением проводилась запись сигналов, как фоновых составляющих, так и сигналов АЭ от имитатора.

Как и ожидалось, уровни фоновых шумов по всем ПАЭ при нагружении несколько подрастали и достигали максимального уровня при нагружении давлением в 10,5 МПа, составив 40 дБ, что, согласно предполагаемых данных, ниже уровня сигналов АЭ на 35 дБ. Построенная ВКФ для шумоподобных сигналов, не позволила локализовать местоположение источника АЭ.

Практически для всех режимов нагружения БС использование имитатора сигналов показало высокую эффективность локации источника АЭ, причем уровень сигналов АЭ был выше уровня фоновых шумов на 20÷30 дБ. Форма ВКФ, по которой определялась локация источника, носит ярко выраженный характер, что свидетельствует об однозначности локации источника АЭ (рис. 8). С учетом ранее полученных значений скорости распространения упругих колебаний по металлу БС погрешность локации источника АЭ по результатам экспериментов составила не более 0,1 м. В соответствии с идеологией двойного контроля (методом АЭ – локализуется

зона, а далее ультразвуковым методом детально анализируется выявленная опасная зона) погрешность в 3÷5% вполне удовлетворяет требованиям к объемам последующего ультразвукового контроля.

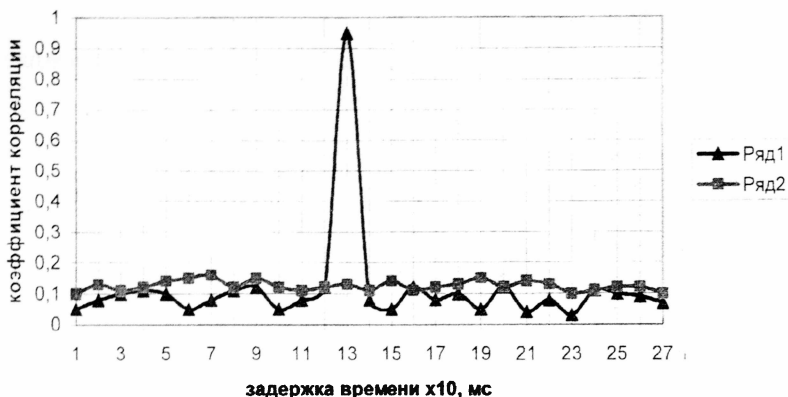


Рис. 8 ВКФ для сигнала АЭ (ряд 1) и фонового шума (ряд 2).

ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ И РЕЗУЛЬТАТЫ

1. Основными проблемами ближайшего будущего в оборудовании КМПЦ следует ожидать появление небольших по размерам (длина) дефектов, которые выйдут на поверхность и приведут к утечкам. В настоящий момент наблюдались дефекты, составляющие 15÷20 мм по высоте и до 50 мм в длину.

2. Образование и подрастание трещины в диапазоне 2÷4 мм сопровождается регистрацией АЭ сигналов от дефектов с энергией ($80 \div 105 \cdot 10^{-15}$) Дж. Характеристикой, позволяющей отличить пластическую деформацию от подрастания трещины, может служить длительность АЭ сигнала. Так для пластической деформации характерна большая длительность АЭ сигнала $\sim 1000 \div 3000$ мкс, для подрастания трещины длительность АЭ сигнала составляет $\sim 300 \div 500$ мкс.

3. Коэффициент Ω , равный отношению частоты, на которой наблюдается нормированный максимум в спектре, к ширине спектра, где отмечаются ослабления амплитуды до величины 0.4, будет, существенно отличаться для сигналов АЭ, характерных для процесса образования локальной пластической деформации ($\Omega \approx 2$), от сигналов АЭ, характерных для развития трещины ($\Omega \approx 8 \div 10$). Этот коэффициент может служить отличительной особенностью развития трещины.

4. Для процесса подрастания трещины характерным является средние и большие значения взаимно корреляционной функции $x(t)$ и $y(t)$ двух АЭ сигналов, пришедших на два датчика. Эти значения лежат в интервале 0,44-0,82. В большинстве случаев эти значения выше 0,62 (максимального значения $\rho_{xy}(t)$, отмеченного до момента визуального обнаружения трещины).

5. Проведенные исследования на КМПЦ РБМК показали, что все рассматриваемые элементы оборудования КМПЦ могут быть проконтролированы АЭ методом. Вся поверхность объектов доступна для "прослушивания" АЭ системой. Различные сочетания расположений излучающего имитатора сигналов АЭ (возможного дефекта), установленного как на внутренней, так и на наружной поверхности БС, и приемного ПАЭ показали, что зон недоступных для АЭ контроля (мертвых зон) нет.

6. Обнаружение источников АЭ от имитаторов Су-Нильсена (аналог по амплитудным и частотным характеристикам усталостных и коррозионных трещин) позволяет сделать заключение о возможности обнаружения основных дефектов эксплуатации оборудования КМПЦ – усталостных трещин.

7. Скорости распространения различных типов ультразвуковых волн лежат в двух основных диапазонах: $V_I - 5200 \div 5600$ м/с и $V_{II} - \sim 3000$ м/с, что примерно соответствует скорости распространения продольной и поперечной волны соответственно. В каждом конкретном случае необходимо проводить проверку на правильность выбранной скорости. Предпочтительнее проводить локацию источников АЭ, используя скорости поперечных (поверхностных) волн, т.е. ~ 3000 м/с – для Ду800 и коллекторов и ~ 5200 м/с – для БС.

8. Максимально установленная величина затухания ультразвуковых волн, для БС составила 7 дБ/м, что определяет максимальное расстояние между устанавливаемыми ПАЭ в 3м. Уровень фона составляет 40 дБ и превышение над ним (пороговое напряжение) определяются отдельно для каждого конкретного объекта и устанавливается в районе 50 дБ.

9. Эффективность обработки АЭ сигналов с учетом предложенной корреляционной матрицы и функции когерентности оказалась выше, чем при применении традиционного корреляционного анализа. Алгоритм обработки сигналов по предлагаемой процедуре позволяет сохранить значение коэффициента корреляции R_{xy} на уровне 0,75 при соотношении сигнал/шум=0,5 ($G_c/G_{ш}=0,5$).

10. Предложено использование корреляционной матрицы в качестве информативного признака АЭ сигнала. Нормированный «объем» корреляционной матрицы определяет наличие сигнала АЭ в шумоподобных сигналах оборудования, что наиболее эффективно при проведении опрессовочных работ на КМПЦ.

11. Использование функции когерентности позволяет оптимизировать диапазон частот огибающей сигнала и выделить АЭ сигнал от дефекта на фоне шумов оборудования.

12. Разработана методика АЭ контроля оборудования КМПЦ: барабан-сепаратора, напорного и всасывающего коллекторов, а также трубопроводов Ду 800. Натурные испытания, проведенные на Курской АЭС, показали работоспособность разработанной методики.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ ОПУБЛИКОВАНО В РАБОТАХ

1. Стрелков П.Б., Бигус Г.А. Применение метода АЭ для контроля эксплуатационных дефектов элементов оборудования атомных электростанций при их длительной эксплуатации // Эффективность реализации научного, ресурсного и промышленного потенциала в современных условиях: Материалы Третьей Промышленной конференции с международным участием и выставки, 24 – 28 февраля 2003 г., п. Славское (Карпаты), – Киев, 2003. – С. 103-104.
2. Бигус Г.А., Стрелков П.Б. Исследование распространения упругих волн в металле барабан-сепаратора контура многократной принудительной циркуляции РБМК// Современные методы и средства неразрушающего контроля и технической диагностики: Материалы Одиннадцатой юбилейной международной конференции, 6 – 10 октября 2003 г., г. Ялта, – Киев, 2003. – С. 13-15.
3. Бигус Г. А., Стрелков П. Б. Акустико-эмиссионные характеристики сигналов при деформировании и разрушении образцов из стали 22К // Техническая диагностика и неразрушающий контроль. – 2005. – № 1. – С. 10-15.
4. Стрелков П.Б., Бигус Г.А. Разработка методики акустико-эмиссионного контроля применительно к оборудованию КМПЦ // Образование через науку: Тезисы докладов международной конференции, 17-19 мая 2005 г., Москва, 2005 – С. 241-242.
5. Стрелков П.Б., Бигус Г.А. Адаптация АЭ методики контроля оборудования реактора РБМК// Современные методы и средства неразрушающего контроля и технической диагностики: Материалы Тринадцатой международной конференции, 3 – 7 октября 2005 г., г. Ялта, – Киев, 2005. – С. 127.
6. Стрелков П.Б., Бигус Г.А., Быстрова Н.А. Исследования акустико-эмиссионных свойств материалов контура многократной принудительной циркуляции атомного реактора // Неразрушающий контроль и техническая диагностика: Материалы 5-й Национальной научно-технической конференции 2006 г., Киев. – С. 66-74.