

УДК 532.528

DOI: 10.46960/1810-210X_2020_4_63

С.Н. Пичков¹, Д.А. Захаров¹, А.А. Хлыбов²**ФИЗИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ВОЛНОВОДНЫХ ЛИНИЙ ДЛЯ АКУСТИКО-ЭМИССИОННОГО КОНТРОЛЯ ЦЕЛОСТНОСТИ МЕТАЛЛА КОРПУСНЫХ КОНСТРУКЦИЙ ЯДЕРНЫХ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ УСТАНОВОК**¹Опытное конструкторское бюро машиностроения им. И.И. Африкантова²Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева

Представлены результаты разработки системы акустико-эмиссионного контроля целостности металлических материалов и оборудования АЭС в процессе их эксплуатации. Показано, что в условиях длительной эксплуатации при высоких температурах, сложной геометрии объекта контроля, агрессивной среды, радиации, повышенного уровня помех при акустико-эмиссионном контроле можно использовать волноводные линии. Приводятся данные по выбору формы и размеров акустических трансформаторов, материала для волноводных линий, удовлетворяющих требованиям условий эксплуатации и обеспечивающих согласование с приборами акустико-эмиссионного контроля. Представлены экспериментальные данные по затуханию упругих волн, распространяющихся как в волноводе, находящемся на воздухе, так и в волноводе, погруженном в водную среду. Эти данные использовались при оптимизации волноводной линии. Описаны результаты экспериментов по отладке работоспособности системы в лабораторных условиях для различных волноводных линий и условий эксплуатации.

Ключевые слова: акустическая эмиссия, упругие волны, скорость, затухание, волновод, неразрушающий контроль, безопасная эксплуатация ЯЭУ, техническая диагностика.

На стадии эксплуатации [1-6] ответственного оборудования атомных электростанций (АЭС) в ряде случаев главным критерием безопасной эксплуатации становятся дефекты, не только имеющиеся в конструкции, но и вновь образовавшиеся или развивающиеся. В процессе эксплуатации они могут привести к сбоям работоспособности оборудования (в том числе, разрушению или аварии) до очередного технического обслуживания. Для повышения безопасности на стадии эксплуатации такие дефекты необходимо найти и проанализировать степень их опасности. Результаты статистических исследований показывают, что при длительной эксплуатации число опасных дефектов в конструкции увеличивается и тем самым возрастает вероятность создания аварийной ситуации. Таким образом, задача обнаружения наиболее вероятных мест разрушения в процессе эксплуатации, прогнозирование их развития при котором они приводят к отказу является актуальной задачей.

Ядерные энергетические установки (ЯЭУ) эксплуатируются в сложных условиях: высокие температуры, коррозионная среда, повышенное давление, повышенный уровень радиации, а также множество других неблагоприятных факторов. Обеспечение безопасной эксплуатации оборудования ЯЭУ требует разработки новых подходов к диагностике и контролю целостности, позволяющих эксплуатировать конструкцию в сложных условиях. Условия безопасной эксплуатации также требуют, чтобы выбираемые методы неразрушающего контроля обеспечивали бы освидетельствование оборудования не только в ремонтный период, но и в процессе эксплуатации: именно в процессе эксплуатации происходит зарождение и развитие опасных дефектов. Среди современных методов неразрушающего контроля, пригодных для использования в процессе эксплуатации, является метод акустической эмиссии, основанный на анализе параметров сигналов акустической эмиссии (АЭ). [1-3]. В основе метода лежит физическое явление излучения упругих напряжений при быстрой локальной перестройке структуры материала: пластическая деформация, зарождение и распространение трещин. Возбуждение упругих волн возможно только при достижении критического значе-

ния напряжений в некоторой области контролируемой конструкции. Регистрируемые сигналы АЭ представляют собой поток случайно распределенных импульсов, накладывающихся друг на друга и вызывающих смещение поверхности конструкции. Частотный спектр сигнала АЭ меняется от единиц килогерц до нескольких мегагерц.

В качестве информативных параметров обычно используются:

- N – число регистрируемых импульсов;
- τ_n – длительность импульса;
- A – амплитуда регистрируемого сигнала;
- $\frac{dN}{dt}$ – интенсивность, число импульсов в единицу времени.

Каждый из перечисленных параметров несет информацию о процессах, происходящих в материале. Регистрируя и анализируя сигналы АЭ можно определить так же прочностные параметры, как начало пластической деформации, зарождение и развитие трещины. Если параметр не превышает заданной величины, то конструкция считается пригодной к эксплуатации. При превышении параметром заданной величины конструкция подвергается дополнительному контролю. Выбор критерия пригодности конструкции к эксплуатации по сигналам АЭ основан на связи параметров АЭ с процессами, протекающими в материале. В случае выявления источников в месте их расположения проводят обследование другими методами: ультразвуковым, радиационным, магнитным, проникающими веществами, другими. При этом сокращается объем применяемых методов неразрушающего контроля, поскольку нет необходимости проведение сканирования по всей поверхности ОК. Следует отметить, что использование методов неразрушающего контроля [8,9] (в частности, метода АЭ) при обеспечении безопасной эксплуатации оборудования ЯЭУ и использование результатов контроля при оценке выработанного ресурса, имеет важное значение.

По сравнению с другими методами [10, 11] неразрушающего контроля (НК) метод АЭ имеет ряд преимуществ:

- обнаружение зарождающихся и развивающихся дефектов в процессе эксплуатации;
- определение места расположения дефектов;
- обеспечение контроля в процессе эксплуатации конструкции или в процессе ее нагружения (это позволяет контролировать конструкцию в реальном масштабе времени и, как следствие, своевременно обнаружить дефекты при развитии аварийной ситуации);
- АЭ системы работают в дистанционном, автоматическом режиме практически в любом конструктивном узле энергетической установки, в том в не обслуживаемых радиационно опасных помещениях атомной станции.

Для АЭ контроля обычно используют пьезоэлектрический преобразователь (ПЭП), чувствительным элементом которого является пьезокерамика. Температура пьезокерамики в процессе эксплуатации не должна превышать 300 °С. Это ограничивает возможности ее использования. Для защиты от коррозии необходимо использовать специальные изолирующие материалы. Также следует отметить стойкость керамики к радиации. Но работа обслуживающего персонала в условиях радиации практически невозможна. Датчик АЭ вырабатывает электрический сигнал при деформации поверхности исследуемого материала. Для обеспечения контроля пьезоэлектрические преобразователи размещают на поверхности контролируемого объекта. Пьезопреобразователь располагается в зоне расположения наиболее вероятного дефекта. Это обеспечивает наиболее высокую чувствительность, минимальную вероятность пропуска развивающегося дефекта.

Известно, что условия эксплуатации энергетических установок являются сложными (высокая температура, радиация, химически агрессивная среда), а также сложность замены пьезопреобразователей установка датчиков в зоне предполагаемого расположения дефектов невозможна. Требуется защита датчиков от указанных выше воздействий. Одним из возможных направлений решения такой задачи является размещение чувствительных пьезопреоб-

разователей вне зоны экстремальных воздействий. Для передачи сигналов АЭ используются конструкции из материалов, обеспечивающие распространение упругих волн на значительные расстояния в выбранном диапазоне частот. Наиболее простым и надежным способом передачи акустических колебаний на пьезопреобразователь является использование волноводов. Волновод – это канал с резкими границами в виде стенок, свойства которых резко отличаются от свойств внутренней и наружной сред. В качестве такой среды в данной работе рассматриваются металлические стержни (проволока) с различной формой поперечного сечения. В данной работе использовалась проволока из стали аустенитного класса.

При выборе волноводов необходимо учитывать поперечные размеры и длину упругой волны, так как это влияет на условия распространения упругих волн. Для используемого на практике диапазона частот АЭ-сигнала длина упругой волны, распространяющейся в волноводе, больше или сравнима с поперечными размерами волновода. При таких условиях на боковых границах волновода исчезают механические напряжения, влиянием границ можно пренебречь. В результате наблюдается ряд явлений.

1. Распространяются только упругие волны, векторное поле смещений которых удовлетворяет условию исчезновения на боковой поверхности упругих напряжений. Такие волны принято называть нормальными волнами: они распространяются без изменения формы.

2. Для данной частоты возбуждения одновременно могут существовать несколько нормальных волн, различающихся распределением поля смещений по сечению. Амплитуда колебаний в результирующей волне является суперпозицией колебаний в каждой из нормальных волн.

3. Скорость распространения упругих волн зависит от частоты, имеет место так называемая дисперсия скорости звука. Дисперсия приводит к искажению акустико-эмиссионного импульса. При узкополосном сигнале форма волны меняется, но форма ее огибающей остается без изменения. При распространении широкополосного сигнала меняет свою форму и огибающая. Для импульсных АЭ сигналов это приводит к значительной ошибке при определении местоположения источника АЭ.

Резонансная частота однородного тонкого волновода со свободным концом определяется по формуле [1] (1):

$$F_0 = \frac{C \cdot k}{2 \cdot L} \quad (1)$$

где L – длина волновода; C – скорость звука; $k=1, 2, 3, \dots$ – порядок гармоники.

Из компромиссных соображений обеспечения помехозащищенности и минимального затухания сигнала АЭ в объекте контроля частотный диапазон приема сигналов выбирается обычно в пределах 0,1... 2,0 МГц. Это условие обеспечивается используемой аппаратурой. В зависимости от конкретных условий распространения сигнала, наличия помех, и характеристик используемого преобразователя рабочую полосу частот выбирают более узкой 100...300 кГц.

Для волноводов, в которых распространяется продольная волна в диапазоне частот 100...300 кГц, справедливо соотношение (2):

$$d \cdot f / C \leq 0.4 \quad (2)$$

где d – диаметр волновода; f – частота; C – скорость продольной волны.

Рассматриваем случай, когда распространяется только одна продольная волна [2]. Скорость распространения продольной волны в стальных волноводах порядка 6000 м/с. Конструкция волноводов для передачи сигналов АЭ должна выбираться таким образом, чтобы диапазон рабочих частот находился намного выше его нижней резонансной частоты. При длине стального волновода 0,5 м низшая частота собственных продольных колебаний, рассчитанная по формуле (2.1), составит $f_i \approx 5$ кГц. Длина стального волновода определяется условиями размещения приемных датчиков АЭ: от зоны контроля до зоны установки датчиков.

Если диапазон регистрации занимает полосу частот от 100 до 200 кГц. Возбуждение волновода на таких высоких частотах дает существенные преимущества: отдельные резонансные пики от различных мод, накладываясь один на другой, дают относительно плавную кривую зависимостей переходного импеданса и передаточной функции волновода от частоты [3].

Из условия (2), а также из условий размещения датчиков относительно зоны контроля, для передачи сигналов АЭ целесообразно применять волноводы диаметром 0,8...3,0 мм. Полученные экспериментальные данные показали, что для выбранного поперечного сечения наблюдается лишь некоторое расплытие волнового пакета, которое не оказывает существенного влияния на принимаемые АЭ сигналы.

Диаметр приемного датчика АЭ (порядка 10 мм), согласованного с АЭ аппаратурой значительно превышает диаметр используемых волноводных линий, поэтому крепление АЭ преобразователей к волноводу с другим диаметром представляет собой сложную задачу с точки зрения стабильности получаемых характеристик. Поскольку пьезопреобразователи имеют диаметр больше диаметра волновода, то для согласования волновода с датчиком необходимо использовать акустические концентраторы, которые трансформирует нагрузку, приложенную к входному концу, до некоторого значения на его выходе. Коэффициент трансформации:

$$K = Z_{\text{вх}}/Z_{\text{вых}} = S_{\text{вх}}/S_{\text{вых}} \quad (3)$$

где $Z_{\text{вх}}$ – нагрузка на входном конце; $Z_{\text{вых}}$ – нагрузка на выходном конце; $S_{\text{вх}}$ – площадь входного торца; $S_{\text{вых}}$ – площадь выходного торца.

На практике наибольшее распространение получили концентраторы трех типов: ступенчатые, конические и экспоненциальные (рис. 1). Диаметр концентратора определяется диаметром волновода с одной стороны и диаметром ПЭП, с другой стороны. Длина концентратора определяется длиной волны на резонансной частоте.

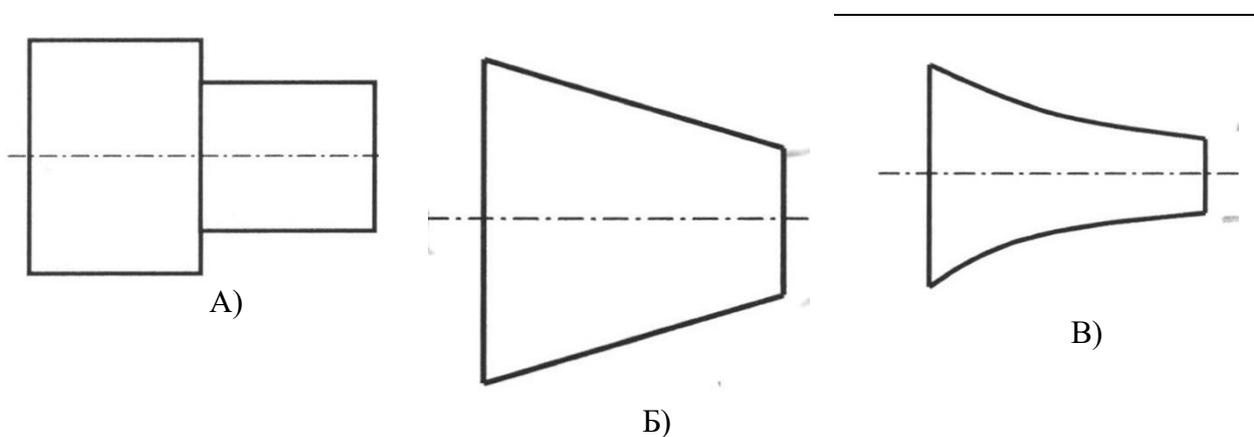


Рис. 1. Типы концентраторов:

А – ступенчатый, Б – конический, В – экспоненциальный

Из представленных концентраторов минимальное искажение и переотражение сигнала имеют экспоненциальные концентраторы. Концентратор выполняется из того же материала, что и волновод, и соединяется с ним при помощи сварки.

Проведем экспериментальные исследования [2] волноводных линий, изготовленных из стальной проволоки (сталь 12Х18Н10Т) диаметром 3 мм длиной 10, 8, 6 и 5 м. В испытаниях использовали волноводы из неотожженной и отожженной проволоки. Отжиг применяли для получения однородной аустенитной структуры, температура отжига при 1050°C с охлаждением с печью. К одному концу волновода был приваривали экспоненциальный концентратор, служащий для согласования волновода с ПЭП. Другой конец волновода при-

варивали к стальной пластине, имитировавшей контролируемую поверхность. Схема размещения датчиков и приварки волноводной линии представлена на рис. 1.

Для регистрации и анализа АЭ сигналов использовали акустико-эмиссионную систему DiSP-8, работающую в режиме анализа формы сигнала, с комплектом среднечастотных резонансных датчиков типа R15I (резонансная частота 150 кГц) со встроенным малошумящим предварительным усилителем на 40 дБ. Имитацию сигналов АЭ осуществляли ПЭП типа П113 (0,02-0,2), возбуждаемого электрическими импульсами от генератора прямоугольных импульсов Г5-54, обеспечивающего: частоту следования импульсов – 10 Гц; амплитуда генерируемых импульсов – 60 В; длительность возбуждающего электрического импульса – 0,1 мкс. Схема расположения имитирующих датчиков представлена на рис. 1. Датчики располагали следующим образом: ПЭП № 1 устанавливали рядом с местом приварки волновода к поверхности пластины; ПЭП № 2 при помощи механического прижима крепили к широкому концу концентратора. Преобразователь-имитатор АЭ сигналов ПЭП № 3 устанавливали на поверхность пластины рядом с ПЭП №1 (рис. 2). Для обеспечения акустического контакта установку датчиков производили через слой контактной смазки, в качестве которой использовали литол.

Одним из важнейших показателей, обеспечивающих возможность применения волноводных линий является затухание упругих волн в волноводной линии. Для измерения затухания сигналов проводили сравнение амплитуд сигналов, полученных с ПЭП № 1 и № 2. Все волноводные линии испытывали как в обычных условиях (на воздухе), так и погруженные в емкость с водой. Перед погружением в воду волновод скручивали спиралью с применением текстолитовых стоек-изоляторов для исключения касания витков спирали между собой (рис. 3). Для имитации акустических помех в условиях, когда объект контроля работает в воде, производили сломы стержня карандаша диаметром 0,5 мм и твердостью 2Н на стенках емкости. Генератор прямоугольных импульсов отключали. Результаты измерения затухания сигналов АЭ при прохождении через волноводные линии различной длины приведены на рис. 4.

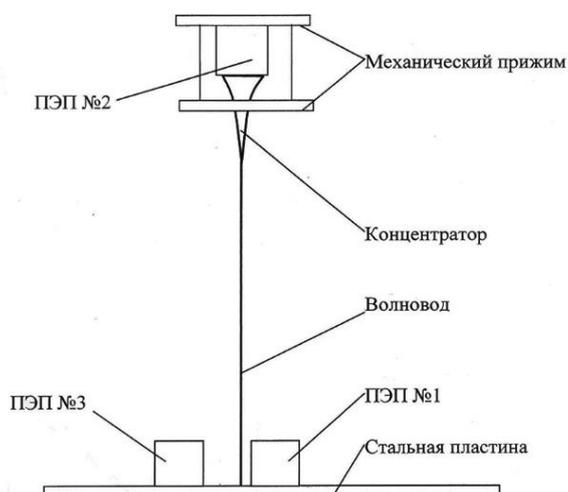


Рис. 2. Эскиз волноводной линии с указанием мест установки ПЭП

Из рис. 4 следует, что затухание АЭ сигналов при нахождении волноводной линии в водной среде больше, чем на воздухе, т.к. граница раздела металл-вода более «прозрачна» для сигналов АЭ, чем граница металл-воздух. Отжиг волноводной линии позволил несколько снизить затухание, что немаловажно при использовании волноводов большой длины, до 10 м и более. При сломах стержня карандаша на стенках емкости с водой в обоих акустических каналах наблюдали сигналы, что говорит о хорошем проникновении акустических помех через воду в волновод, а затем в приемные тракты аппаратуры. Для избавления от этих помех необходимо оградить волновод от контакта с водой при помощи чехловой трубы.

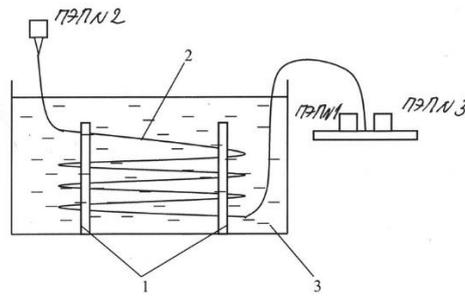


Рис. 3. Схема испытаний волноводной линии в воде:

1 – стойки-изоляторы; 2 – испытываемая волноводная линия; 3 – емкость с водой

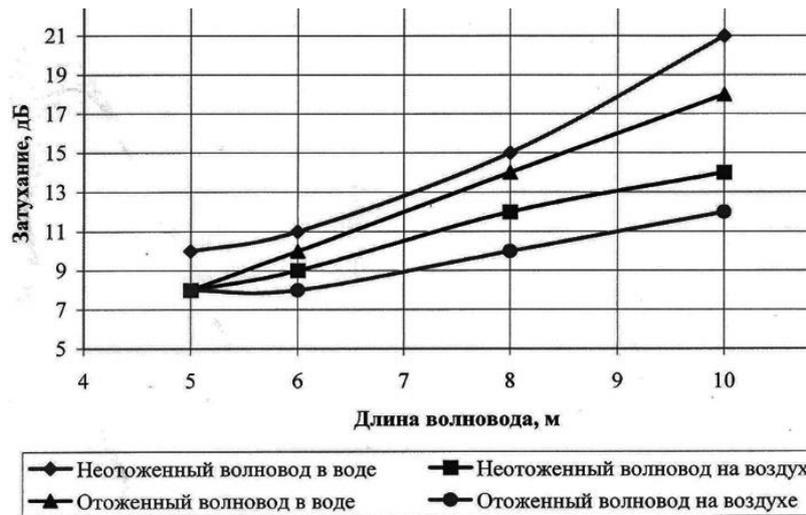


Рис. 4. Затухание сигналов АЭ при прохождении через волноводные линии различной длины

На рис. 5-7 приведены формы сигналов, полученные с ПЭП № 1 и № 2. Формы сигналов, полученные при испытании в воде неотожженного волновода длиной 10 м, показаны на рис. 5. На 1-ой осциллограмме изображен АЭ сигнал, прошедший через волновод (ПЭП № 2), на 2-ой сигнал, полученный в месте приварки волновода к пластине (ПЭП № 1). Импульс, прошедший через волновод, имеет пологий передний фронт, его максимум смещается вправо по оси времени, что отрицательно скажется на определении координат источника сигнала.

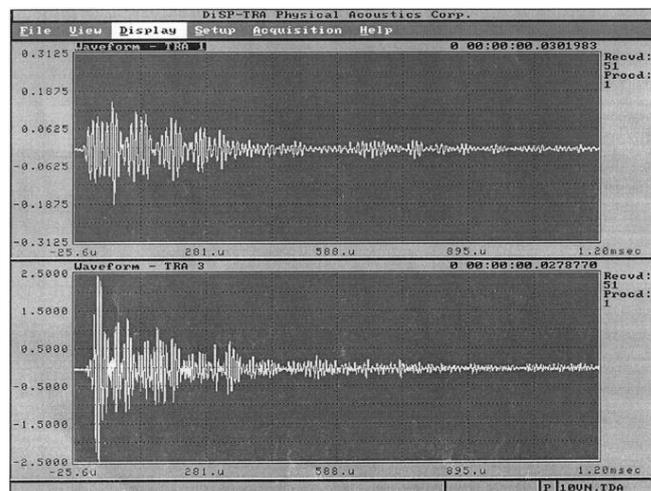


Рис. 5. Формы сигналов АЭ, полученных при испытании неотожженного волновода, длина 10 м

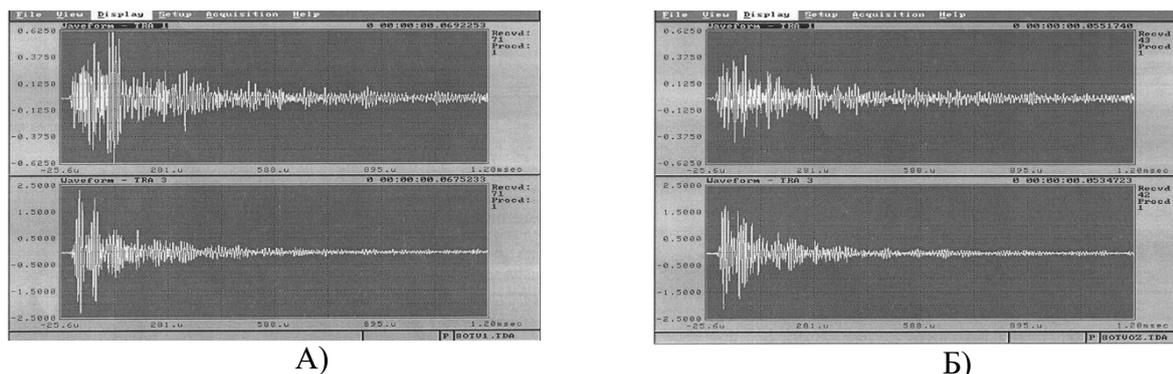


Рис. 6. Форма сигнала АЭ при испытании отожденного волновода длиной 8 м:

А) в воде, Б) на воздухе

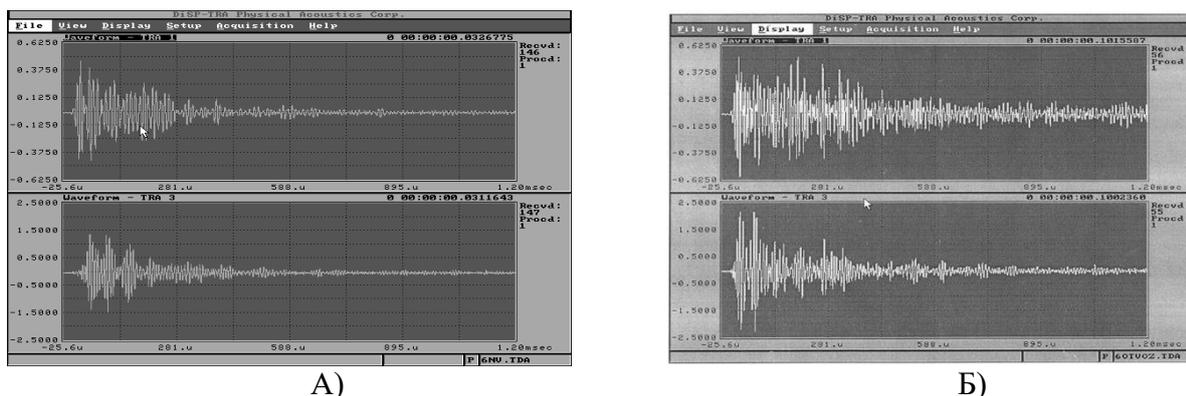


Рис. 7. Форма сигнала АЭ при испытании отоженного волновода длиной 6 м:

А) в воде, Б) на воздухе

На рис. 6 (А, Б) изображены осциллограммы, полученные при испытании 8-ми метровых волноводов. Форма импульса, прошедшего через волноводную линию, также имеет пологий передний фронт, и максимум смещен по времени.

На рис. 7 (А, Б) изображены осциллограммы, полученные при испытании 6-ти метровых волноводов (осциллограммы, полученные для 5-ти метровых волноводов, имеют схожую форму). Форма импульса, прошедшего через волновод, мало отличается от принятой с поверхности пластины. С учетом относительно небольшого затухания (величиной 8 дБ) можно сказать, что регистрация АЭ сигналов с помощью волноводной линии длиной 5-6 м принципиально не отличается от регистрации непосредственно с поверхности контролируемого объекта и не оказывает значительного влияния на процесс локализации источников АЭ.

Проведенные исследования показали, что:

- использование волноводных линий расширяет возможности акустико-эмиссионного метода контроля развивающихся дефектов в оборудовании ЯЭУ (сварные соединения корпусов реакторов, насосов, парогенераторов и др.);
- контролируемые зоны подводных объектов контроля могут быть расположены на глубине до 6 м.

Библиографический список

1. Акустическая эмиссия и ее применение для неразрушающего контроля в ядерной энергетике / под ред. К.Б. Вакара. – М.: Атомиздат, 1980. – 216 с.
2. Прочность и акустическая эмиссия материалов и элементов конструкций / В.А. Стрижало, Ю.В. Добровольский, С.Н. Пичков [и др.]; отв. ред. Г.С. Писаренко. – Киев: Наук. думка, 1990. – 232 с.

3. **Пичков, С.Н.** Исследования кавитационных процессов в насосном оборудовании акустическим методом / С.Н. Пичков, Д.А. Захаров, Э.Г. Новинский // Труды НГТУ им. Р.Е. Алексеева. – № 4 (123).
4. ПНАЭ Г-01-011-97 (ОПБ 88/97) Общие положения обеспечения безопасности атомных станций.
5. **Митенков, Ф.М.** Методы обоснования ресурса ядерных энергетических установок / Ф.М. Митенков, В.Б. Кайдалов, Ю.Г. Коротких, С.Н. Пичков. – М.: Машиностроение, 2007. – 445 с.
6. **Хлыбов, А.А.** Обеспечение эксплуатации крупногабаритных конструкций по техническому состоянию: Монография / А.А. Хлыбов. – Н. Новгород: НГПУ, 2008. – 136 с.
7. **Голямина, И.П.** Ультразвук. Маленькая энциклопедия / И.П. Голямина. – М.: Советская энциклопедия, 1979. – 400 с.
8. **Клюев, В.В.** Неразрушающий контроль. Том 3. Ультразвуковой контроль / В.В. Клюев. – М.: Машиностроение, 2004. – 864 с.
9. **Иванов, В.И.** Метод акустической эмиссии. Неразрушающий контроль: Справочник / В.И. Иванов, И.Э. Власов. В 7 т. Под общ. ред. В.В.Клюева. Т. 7. Кн. 1. М.: Машиностроение. 2005. – 340 с.
10. **Иванов, В.И.** Акустико-эмиссионная диагностика: справ / В.И. Иванов, В.А. Барат. – М.: Издательский дом «Спектр», 2017. – 368 с.
11. **Шайбаков, Р.А.** Помехоустойчивый метод акустико-эмиссионного мониторинга резервуаров / Р.А. Шайбаков, Д.Г. Давыдова, А.Н. Кузьмин, Н.Х. Абдрахманов., А.Г. Марков // Нефтегазовое дело. – 2013. – №4. – С. 448-464.
12. **Шемякин, В.В.** Аспекты применения метода акустической эмиссии для мониторинга опасных промышленных объектов / В.В. Шемякин, С.А. Стрижков // В мире неразрушающего контроля. – 2004. – №4. – С. 16-19.

*Дата поступления
в редакцию: 01.10.2020*

S.N. Pichkov¹, D.A. Zakharov¹, A.A. Khlybov²

PHYSICAL ASPECTS OF THE USE OF WAVEGUIDE LINES FOR ACOUSTIC-EMISSION CONTROL OF THE INTEGRITY OF THE METAL OF HULL STRUCTURES OF NUCLEAR POWER FACILITIES

¹Afrikantov OKB Mechanical Engineering

²Nizhny Novgorod state technical university n.a. R.E. Alekseev

Purpose: The article presents the results of work on the development of a system for acoustic emission control of the integrity of metal materials and equipment of nuclear power plants during their operation.

Findings: It is shown that in conditions of long-term operation at high temperatures, complex geometry of the control object, aggressive environment, radiation, high noise level and other complex operating conditions, waveguide lines can be used for acoustic emission control.

Data on the choice of shape and size of acoustic transformers, the choice of material for waveguide lines that meet the requirements of operating conditions and ensure compliance with acoustic emission control devices are provided. Experimental data on the attenuation of elastic waves propagating both in a waveguide located in air and in a waveguide immersed in an aqueous medium are presented. This data was used to optimize the waveguide line.

Results: The results of experiments on debugging the system's operability under laboratory conditions for various waveguide lines and operating conditions are described.

Key words: acoustic emission, elastic waves, speed, attenuation, waveguide, non-destructive testing, safe operation of nuclear power plants, technical diagnostics.