

Метрологические аспекты регистрации энергетических параметров акустической эмиссии материалов

В. Н. ОВЧАРУК

Тихоокеанский государственный университет, Хабаровск, Россия, e-mail: ovaler@ya.ru

Проанализированы основные проблемы акустико-эмиссионного метода неразрушающего контроля. Проведена сравнительная оценка эффективности параметров сигналов акустической эмиссии. Показана неадекватность методов анализа в узкой полосе частот. Обоснована необходимость применения методов спектрального анализа для повышения точности и достоверности результатов.

Ключевые слова: неразрушающий контроль, акустико-эмиссионная диагностика, спектральный анализ, амплитудно-частотная характеристика.

The major problems of acoustic emission nondestructive testing method are analyzed. The comparative estimation of acoustic emission signals effectiveness is carried out. The inadequacy of analysis methods in the narrow band of frequencies is shown. As an example the comparative results of the acoustic emission signals spectral analysis are presented. The necessity of using the spectral analysis methods to increase the accuracy and reliability of results is demonstrated.

Key words: nondestructive testing, acoustic-emission diagnostics, spectral analysis, gain-frequency characteristic.

Одним из наиболее чувствительных методов неразрушающего контроля (НК) является метод акустической эмиссии (АЭ) [1—4]. Его применение актуально для решения задач диагностики и прогнозирования в реальном времени, а результаты при испытаниях уникальных изделий позволяют не только экономить материальные ресурсы, но и решать вопросы обеспечения безопасности процесса испытаний. Однако метод АЭ-диагностики так и не занял достойного места в линейке методов НК. Исключением являются пневмоиспытания сосудов давления, где основная задача — предотвращение катастрофического разрушения объекта контроля. Ограничениями метода являются низкая достоверность и неоднозначность трактовки результатов контроля АЭ вследствие чрезмерного усложнения методик обработки при недостаточном метрологическом обеспечении.

Из сопоставления основных единиц измерения АЭ с единицами Международной системы следует, что при описании АЭ общепринятые акустические величины практически не используются [5]. Это говорит о том, что еще на ранней стадии исследований явления АЭ остро обозначились проблемы достоверности параметров и точности их измерения, которые с годами только усугублялись [4, 6, 7]. Все существующие нормативные документы [8—12] рекомендуют к использованию параметры, основанные на счете импульсов, которые не позволяют количественно оценивать процесс трещинообразования. При этом под импульсом подразумевается некое событие в акустическом тракте, преобразованное приемным преобразователем (ПП) в электрический сигнал и вызвавшее превышение заданного порога чувствительности. Учитывая широту понятия импульса, в нормативных документах введены новые термины и уточнения, но это не меняет сути. Пользователю предложено самостоятельно

разобраться в многочисленных режимах и параметрах, утвержденных нормативными документами, и определить, как ими пользоваться в каждом конкретном случае.

Ныне действующий стандарт [9] был разработан в 1988 г. и требует модернизации. Он подвел итог этапу активного изучения явления АЭ. Позже научные центры, занимавшиеся изучением явления АЭ и разработкой аппаратуры АЭ-контроля, изменили основное направление деятельности или прекратили существование. Наступила эра коммерческого использования АЭ. В результате метод был частично дискредитирован, и интерес к нему представителей промышленного комплекса упал [4, 6, 7, 13, 14].

В настоящее время перед исследователями и разработчиками стоит задача доказать состоятельность метода АЭ и более четко обозначить область его применения [7]. Как и любой метод НК, метод АЭ имеет свои ограничения и противопоказания, которые должны регламентироваться нормативными документами. Это касается и существующих ныне многочисленных параметров АЭ, большинство из которых в [9] не упоминаются.

В 2007 г. был введен новый стандарт [12], но он не поясняет и не регламентирует применение параметров сигналов АЭ, ссылаясь по этим вопросам на [9]. В [9] ряд терминов, казалось бы, определяют одно и то же: источник АЭ, сигнал АЭ (подразделяется на акустический и электрический), акт АЭ, волновой пакет АЭ, импульс АЭ, выброс АЭ. И хотя АЭ при этом делится на дискретную и непрерывную, большинство терминов характеризуют именно дискретную АЭ.

Среди основных параметров, указанных в стандартах, четыре из шести характеризуют счет импульсов: число импульсов АЭ, суммарный счет АЭ, активность АЭ и скорость счета

АЭ. Еще два параметра — энергия источника АЭ и энергия АЭ характеризуют энергию механических колебаний в месте излучения и энергию, переносимую акустическими волнами. Эти характеристики подразумевают, что, регистрируя с помощью приемного преобразователя (ПП) энергию, переносимую акустическими волнами, затем вычисляют энергию механических колебаний в месте излучения, решая обратную задачу. Все остальные параметры, в настоящее время применяемые для описания АЭ процессов, в [9] не рассмотрены как основные.

Помимо существующих, авторы [9] вводят новые термины — акт АЭ, волновой пакет АЭ, выброс АЭ, для описания которых не приводится параметров. Все предложенные [9] параметры АЭ описывают импульс АЭ как некое событие. По [9] акт АЭ — это единичное действие (срабатывание) источника АЭ, волновой пакет АЭ — сигнал, порождаемый единичным актом АЭ, выброс АЭ — превышение сигналом АЭ установленного порогового уровня. Все эти термины предназначены для уточнения параметров, характеризующих импульс АЭ как сложную временную форму акустического сигнала. К сожалению, они не прижились и используются крайне редко. В публикациях предпочтение чаще отдается термину импульс АЭ, что говорит об устоявшихся традициях. По определению [9] импульс АЭ есть «сигнал АЭ, значение которого отлично от нуля в интервале времени, в течение которого его значение превышает заданный относительный уровень от максимального», иными словами — это сигнал любой формы и длительности, превышающий заданный пороговый уровень.

Следует отметить, что всем привычный импульс АЭ — это акустический сигнал сложной формы, являющийся реакцией системы «объект—преобразователь» на процессы, вызванные локальной динамической перестройкой структуры материала. При этом одиночный источник выделить на фоне коллективных действий невозможно. Следует отметить, что источником АЭ могут являться и процессы, различные по своей физической природе, но протекающие одновременно [2—4, 7]. При этом энергия механических колебаний, возникающих при образовании и развитии дефекта структуры, в объекте контроля переносится разными типами волн с разной скоростью. А если учесть, что длительность механического импульса, возбуждающего акустическую волну, много меньше (в тысячи раз) реакции системы «объект—

преобразователь» [1, 4], то нетрудно предположить, что решить проблему измерения любых акустических параметров в таких условиях простыми средствами нельзя. Тем более, что любому процессу измерения должна предшествовать процедура идентификации, т. е. необходимо выделить нужные сигналы, убедиться, что именно их регистрируем, и только после этого измерять и делать выводы. В такой ситуации особенно важно четко определить совокупность параметров и их использование.

С точки зрения физики, для изучения состояния объекта контроля прежде всего важна энергия исходного сигнала, возбуждавшего акустическую волну, т. е. энергия источника АЭ, а также ее распределение в пространстве и времени. Если правильно зарегистрировать энергию АЭ, то, зная передаточную характеристику, можно решить и обратную задачу. Стандарт [9] содержит два параметра, характеризующих энергию АЭ и ее распределение. В последние два десятилетия исследователи стали ориентироваться на зарубежные разработки, вводя и используя принятые там параметры АЭ. Это запутало и без того сложную ситуацию. Если [9] устанавливает шесть параметров АЭ, то существующее в настоящее время авторитетное справочное пособие по НК [1] рекомендует к применению уже двадцать шесть параметров, из которых восемнадцать являются первичными. Количество же вторичных параметров, используемых исследователями в работах, неуклонно растет с каждой новой диссертацией и давно превышает разумный предел.

Сложившаяся ситуация неизбежно приводит к упрощениям, так как в реальных условиях трудно определить, какой из многочисленных параметров удовлетворяет решению задачи. Как отмечено в [15], в существующей практике наметились два направления анализа АЭ-информации — по высокочастотной (ВЧ) и низкочастотной (НЧ) составляющим электрического сигнала АЭ, регистрируемого на выходе ПП. При этом под ВЧ-составляющими понимаются осцилляции (заполнение) электрического сигнала АЭ (рис. 1, кривая 1), а под НЧ — огибающая электрического сигнала АЭ (рис. 1, кривая 2).

Большинство разработчиков и исследователей АЭ-систем в настоящее время много внимания уделяет регистрации и обработке именно НЧ-составляющей АЭ-информации [15]. По разным причинам, в том числе и по рекомендациям [12], они применяют в работе в основном узкополосные резонансные ПП, при использовании анализировать ВЧ-составляющую нет смысла. Так, авторы [15], посвященной проблемам АЭ в экспериментальном материаловедении, сознательно отказываются от анализа ВЧ-составляющей, мотивируя это следующим.

«Ввиду фильтрации ВЧ-составляющих сигнала АЭ в процессе его прохождения через исследуемый материал и пограничный слой между поверхностью образца и АЭ-преобразователем, а также прохождения электрического сигнала по аналоговому тракту усиления, исходная информация ВЧ-составляющей искажается коренным образом». Это не означает, что информацию не следует анализировать только потому, что она искажается. Стоит поискать причины и по возможности их устранить. Больше всего информация искажается по причине использования узкополосного ПП и соответствующих каналов.

«Понятие события в исследуемом материале соотносится с огибающей электрического сигнала АЭ, и работа НЧ-со-

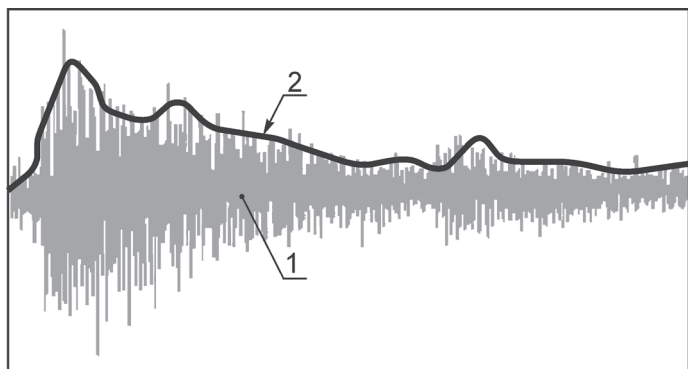


Рис. 1. Высокочастотные составляющие электрического сигнала АЭ (1) и его низкочастотная огибающая (2)

ставляющей имеет вполне конкретный физический смысл». Это утверждение неверно. Огибающая сигнала с выхода узкополосного ПП малоинформативна ввиду отсутствия достоверных сведений о его принадлежности. Значительно больше информации удалось бы получить, наблюдая за изменением энергии идентифицированного сигнала, а для этого нужно знать весь спектр. Событием же может быть и появление в спектре сигнала соответствующих частотных составляющих и сигналов с определенной формой спектральной функции, и многие другие идентифицирующие признаки, которые никак не отражаются на НЧ-составляющей входного сигнала [4, 6, 7, 16, 17].

«Большинство параметров АЭ, таких как длительность события, время нарастания, амплитудное распределение, энергия и т. д., относится к НЧ-составляющей АЭ-информации». Это не так. Анализ в широкой полосе частот показывает, что все эти параметры зависят от частоты, а определение энергии по НЧ-огibaющей вообще не имеет смысла [4, 7, 13, 16]. Это утверждение авторов, по-видимому, основано на использовании зарубежного параметра «MARSE», определяемого как интеграл от огибающей входного сигнала. Его относят к энергетическим параметрам, но он с энергией АЭ линейно не связан [1].

«Одновременное использование двух понятий ВЧ- и НЧ-составляющих в работах по АЭ приводит к подмене понятий и путанице в интерпретации получаемой информации». Это утверждение спорно. Ведь совсем не обязательно использовать два понятия одновременно или подменять одно другим. Анализ ВЧ наполнения и анализ НЧ-огibaющей сигнала АЭ — это абсолютно разные процедуры. Анализируя ВЧ-составляющие, получим возможность идентифицировать сигналы от различных источников и определить энергию каждого из них. Анализ же НЧ-огibaющей позволяет анализировать ее распределение в пространстве и времени. Результаты такого анализа очень трудно перепутать. Можно вообще отказаться от этих понятий и анализировать весь процесс целиком, наблюдая за изменением в пространстве и времени энергии акустического сигнала.

Далее авторы [15] утверждают, что исследования явления АЭ, проводимые в различных условиях и на различных материалах, показывают, что сигналы АЭ имеют широкий спектр амплитудно-временных параметров. С этим утверждением нельзя не согласиться. Оно подтверждается другими многочисленными работами, связанными с анализом спектральных характеристик (СХ) сигналов АЭ [4, 6, 7, 13, 14, 16—21]. Однако из этого утверждения сделан вывод, который в корне меняет подход к анализу: «сигнал АЭ может быть зарегистрирован на любой частоте, а так как амплитуда регистрируемого сигнала убывает обратно пропорционально частоте, то вполне очевидно стремление к регистрации АЭ сигналов на НЧ». Этот момент следует разобрать подробнее, так как авторы работы [15] высказывают достаточно распространенное мнение, называя его «современной тенденцией».

Понятие «амплитуда» связано, прежде всего, с колебательным процессом. В АЭ этот термин прижился давно. Это объясняется широким использованием для регистрации узкополосных резонансных ПП. При этом термин «энергия» АЭ был отодвинут на второй план, так как ее значительно сложнее измерять. В настоящее время этот важнейший параметр АЭ не измеряется, а вычисляется [1]. Это объясня-

ется отсутствием простых технических средств и методик, позволяющих непосредственно измерять энергию акустического сигнала в твердом теле [1, 4]. Следует отметить, что энергия вычисляется по совокупности параметров, зарегистрированных с разной точностью, а для так называемого «точного» расчета энергии и многочисленных «энергетических параметров» в реальном времени применяются упрощенные методики. Во всех этих методиках при расчете используется амплитуда U_m . В одном случае ее возводят в квадрат, в другом — интегрируют огибающую. Ни один из этих параметров не связан с энергией АЭ линейной зависимостью [1].

На рис. 2 приведены графики средних значений $S_{cp}(f_i)$ и области допустимых граничных значений нормированных СХ сигналов АЭ от развивающейся трещины, полученных непосредственно перед разрушением на образцах различных керамических материалов. Полученные результаты подтверждают вывод о высокой нестационарности процесса излучения сигналов АЭ и больших флуктуациях спектральных составляющих [4, 7]. Этот вывод справедлив для всех типов исследуемых керамических материалов. Аналогичный результат был получен и на образцах из разных марок стали, алюминиевых и титановых сплавов [7, 14, 17, 18]. Из рис. 2 следует, что значения энергии, полученные с использованием U_m , не соответствуют действительности. Это свидетельствует о невозможности даже качественного определения энергии в узкой полосе частот.

Известно, что кинетическая энергия звуковой волны определяется как $E = \rho V^2/2$, где ρ — плотность среды, V — колебательная скорость частиц. После преобразования механического колебания в электрический сигнал его энергия определится как

$$E = \frac{1}{Z} \int_0^t u^2 dt, \quad (1)$$

где u — мгновенное значение сигнала, а Z — электрический импеданс элемента электрической цепи. Использование (1), рекомендованного [10] для расчета энергии АЭ, нецелесообразно, так как исходный акустический сигнал в процессе распространения и преобразования сильно искажается под влиянием системы «объект—преобразователь». Возникшие искажения трудно учесть и компенсировать во временной области, по этой причине многие авторы считают задачу восстановления исходного сигнала некорректной [1]. Однако коррекцию данных искажений при определенных условиях можно осуществить в частотной области [4, 7, 13]. Тогда энергию можно определить по спектральной плотности $S(\Omega)$, используя равенство Парсеваля

$$E = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} [S(\Omega)]^2 d\Omega.$$

Учитывая, что в большинстве случаев неравномерность амплитудно-частотной характеристики (АЧХ) системы «объект—преобразователь» можно лишь грубо компенсировать, в [4, 13], рекомендуется использовать приемный преобразователь с АЧХ, равномерной по всему заданному частотному диапазону $K_{пп}(f) \approx \text{const}$ (широкополосный ПП).

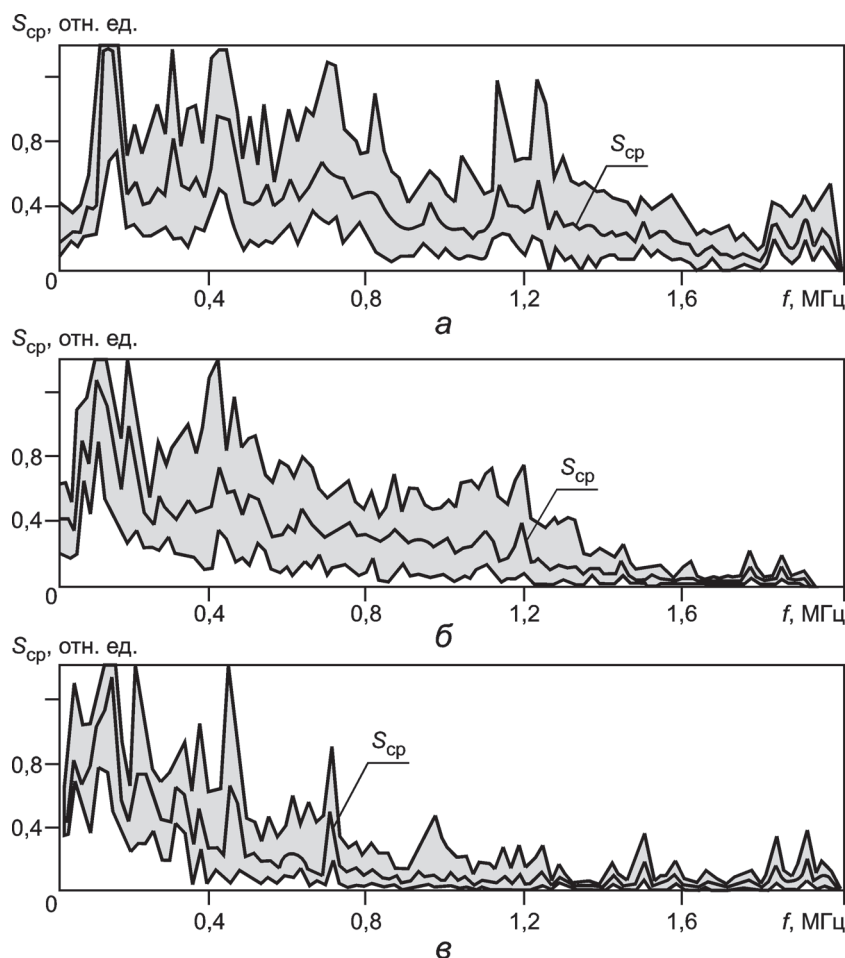


Рис. 2. Усредненные нормированные спектральные функции $S_{cp}(f_i)$ сигналов АЭ от развивающейся трещины для различных образцов:
а — нитрида кремния; б — корундового огнеупора; в — алюмоборонитрида

По известной методике [1], приемный преобразователь АЭ чаще аттестуется по смещению сдвиговой волны. Если предположить, что энергия исходного сигнала равномерно распределяется по заданному частотному диапазону, то при использовании широкополосного ПП для анализа колебательного процесса получим снижение амплитуд спектральных составляющих обратно пропорционально частоте. Это связано с тем, что энергия акустических колебаний пропорциональна скорости сдвиговой волны, следовательно, амплитуда снижается с увеличением частоты колебаний. Если же использовать приемный преобразователь с АЧХ $K'_{nn}(f) \approx \text{const}$ равномерной по скорости, то и спектрограммы акустических сигналов, предварительно скорректированные по АЧХ приемного преобразователя, будут представлять собой функции колебательной скорости сдвиговой волны $S'(f_i) = S(f_i)2\pi f_i / K'_{nn}(f_i)$. Кроме того, увеличение чувствительности в области высоких частот позволяет анализировать все частотные составляющие в одном динамическом диапазоне. Для дискретного спектра с линейной шкалой по оси частот значение энергии сигнала с учетом этой зависимости в заданном частотном диапазоне можно определить по формуле

$$E = a \sum_{i=1}^n [S'(f_i)]^2,$$

где i — номер частотного канала; n — число каналов анализа; a — коэффициент пропорциональности, зависящий от плотности среды, чувствительности ПП, полосы анализа и интервала между дискретными точками.

Если система «объект—преобразователь» является линейной, а это справедливо для большинства твердых тел, то коэффициент пропорциональности $a = \text{const}$. Это значит, что для определения энергии входного сигнала достаточно возвести в квадрат и просуммировать амплитуды спектральных составляющих. При этом все составляющие спектра АЭ будут проанализированы в одном динамическом диапазоне и с одинаковой погрешностью, а функция $E(t)$ в условиях нестационарности процесса излучения будет качественно отображать изменения энергии акустического сигнала. Для получения количественных значений энергии необходимо воспользоваться коэффициентом пропорциональности a . В [4, 13] приведены примеры применения рассчитанных по спектру $E(t)$ и других энергетических параметров при испытании образцов и элементов конструкций.

Использование ПП с равномерной передаточной характеристикой в области исследуемых частот — это обязательное условие. Если же восстанавливать все спектральные составляющие сигнала АЭ с одинаковой погрешностью, то следует использовать АЧХ с $K'_{nn}(f) \approx \text{const}$. Ведь снижение уровня амплитуд ВЧ-составляющих объясняется не только свойствами спектра исходного акустического сигнала, но и влиянием АЧХ системы «объект—преобразователь» и связанных с ним затуханием. Эти влияния необходимо изучать и

обязательно учитывать при регистрации сигналов АЭ. В ВЧ-составляющих сигналов АЭ содержится информация о первоисточнике сигнала АЭ (при регистрации широкополосным ПП), и именно эта информация представляет первоочередной интерес при диагностике состояния материала и прогнозировании разрушения.

В сложившейся ситуации, когда большинство разработчиков аппаратуры АЭ ориентировано на работу в узкой полосе частот, измерить с высокой точностью энергию сигнала и ряд других параметров АЭ просто невозможно. Речь может идти только о регистрации некоего события, достоверность которого еще нужно доказать. Все это тормозит широкое применение метода. Ситуация заставляет рядового специалиста по НК, в лучшем случае прошедшего краткий курс обучения при аттестации, превращаться в ученого-экспериментатора. Такое превращение многим не под силу, что и является основной причиной слабого практического использования метода АЭ. Он, по-прежнему, остается широким полем для проведения многочисленных научных работ.

На основании изложенного выше можно сделать следующие выводы:

необходимо отделить регистраторы, чем является большинство современных средств акустико-эмиссионного конт-

роля, от измерительной аппаратуры и в новых разработках делать упор на измерения ограниченного количества параметров, имеющих физический смысл;

необходимо привести в соответствие единицы измерения акустической эмиссии с единицами Международной системы единиц и отказаться от параметров, основанных на счете импульсов, либо использовать поправочные коэффициенты при регистрации каждого импульса в отдельности, рассматривая его как некое событие;

при регистрации амплитуды сигнала необходимо учитывать ее распределение по частоте, связывая каждое значение амплитуды с соответствующей частотой колебаний, т. е. регистрировать амплитудный спектр сигнала, используя для этих целей широкополосные приемные преобразователи и их аналоги;

категорически не следует измерять энергию сигнала в узкой полосе частот, называя результаты таких измерений «энергетическими параметрами». Энергетические параметры, как и сама энергия акустического излучения, могут быть получены только на основании анализа всего спектра излучения;

с целью снижения погрешности измерения энергетических параметров необходимо проводить калибровку приемных пьезопреобразователей непосредственно на объекте контроля, а при анализе результатов измерений учитывать передаточную характеристику «объект—преобразователь». Предварительно должны быть исследованы АЧХ и ФЧХ используемых ПП, а также диаграммы направленности на предмет их пригодности для решения поставленных задач.

Л и т е р а т у р а

1. **Неразрушающий контроль:** Справочник в 8 т. / Под общ. ред. В. В. Клюева. Т. 7: В 2 кн. Кн. 1: В. И. Иванов, И. Э. Власов. Метод акустической эмиссии. М.: Машиностроение, 2006.
2. **Грешников В. А., Дробот Ю. Б.** Акустическая эмиссия. М.: Изд-во стандартов, 1978.
3. **Баранов В. М.** Акустические измерения в ядерной энергетике. М.: Энергоатомиздат, 1990.
4. **Овчарук В. Н.** Акустико-эмиссионные методы исследования свойств керамических материалов. Хабаровск: Изд-во ТОГУ, 2010.
5. **Единицы физических величин:** Сб. норм.-техн. док. М., 1987.
6. **Корчевский В. В., Ри Хосен.** Рентгенодифрактометрический и акустико-эмиссионный методы исследования пластической деформации сталей. Владивосток: Дальнаука, 2006.
7. **Ovcharuk V. N.** Acoustic emission signals parameters use efficiency considerations // 10th Europ. Conf. on Non-Destructive Testing. Reports. 2013. № 1. [Электрон. ресурс]. http://www.ndt.net/article/ecndt2010/reports/1_07_13.pdf (дата обращения 10.07.2014 г.)

8. **ГОСТ 25.002—80.** Расчеты и испытания на прочность в машиностроении. Акустическая эмиссия. Термины, определения и обозначения.

9. **ГОСТ 27655—88.** Акустическая эмиссия. Термины, определения и обозначения.

10. **РД 03-299—99.** Неразрушающий контроль. Требования к акустико-эмиссионной аппаратуре, используемой для контроля опасных производственных объектов. Серия 28. Выпуск 8. М.: 2005.

11. **ПБ 03-593-03.** Правила организации и проведения акустико-эмиссионного контроля сосудов, аппаратов, котлов и технологических трубопроводов (утв. пост. Госгортехнадзора РФ от 9.06.2003 г. № 77).

12. **ГОСТ Р 52727—2007.** Акустико-эмиссионная диагностика.

13. **Овчарук В. Н., Чье Ен Ун.** Анализ амплитудно-частотных характеристик при изучении свойств керамических материалов методом акустической эмиссии // Вестник ТОГУ. 2007. С. 16—32.

14. **Овчарук В. Н., Лашко В. А., Римлянд В. И.** Программно-аналитический комплекс для измерительной системы акустико-эмиссионной диагностики // Информатика и системы управления. 2012. № 1(31). С. 134—145.

15. **Семашко Н. А. и др.** Акустическая эмиссия в экспериментальном материаловедении. М.: Машиностроение, 2002.

16. **Гуменюк В. А., Сульженко В. А., Яковлев А. В.** Система классификации опасности источников АЭ и критерии экспресс-оценки состояния объектов на основе нечеткой логики // Контроль. Диагностика. 2003. № 1. С. 49—53.

17. **Гуменюк В. А., Казаков Н. А., Несмашный Е. В.** Преобразование спектра и формы сигналов в каналах систем акустико-эмиссионной диагностики // Контроль. Диагностика. 2008. № 7. С. 30—41.

18. **Бачегов В. И. и др.** Опыт применения акустической эмиссии для технологического и эксплуатационного контроля // Сб. докл. X Межд. конф. по неразрушающему контролю. Москва. 1982.

19. **Тверской В. С.** К инженерному расчету энергетического спектра акустической эмиссии // Дефектоскопия. 1980. № 7. С. 94—96.

20. **Гуменюк В. А., Пашин В. М., Иванов Ю. Г.** Программно-аппаратный комплекс и новые возможности АЭ-диагностики корпусных конструкций // Тяжелое машиностроение. 2003. № 3. С. 22—26.

21. **Гришко В. Г. и др.** Методика идентификации механических характеристик материалов по сигналам акустической эмиссии // Проблемы прочности. 1984. № 1. С. 89—92.

22. **Колмогоров В. Н., Соседов В. Н., Глухов Н. А.** Приемники сигналов акустической эмиссии // Дефектоскопия. 1980. № 7. С. 94—96.

Дата принятия 23.06.2014 г.