

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ГЛУБИНЫ ЯЗВЕННОЙ КОРРОЗИИ И СЛЕЖЕНИЕ ЗА ЕЕ РАЗВИТИЕМ МЕТОДОМ АКУСТИЧЕСКОЙ ЭМИССИИ

А.Л. Алякритский, Ю.С. Попков, Е.Ю. Сорокин,

Д.А. Терентьев

(ООО «ИНТЕРЮНИС», г. Москва)

Введение

К язвенной и питтинговой коррозии склонно подавляющее большинство металлов и сплавов. Данные виды коррозии возникает при переработке нефти и газа, в морской воде, растворах солей, в охлаждающих системах холодильных машин, в системах оборотного водоснабжения предприятий и др.

Возникновение язвенной и питтинговой коррозии в процессе эксплуатации технологического оборудования представляет серьезную опасность, а также инициирует другие виды коррозии, например, коррозионное растрескивание и межкристаллитную коррозию.

Стимуляторами язвенной и питтинговой коррозии металлов в водных средах являются ионы Cl^- , Br^- , I^- , CN^- , SO_4^{2-} . Анионы-активаторы в тех или иных количествах присутствуют в подавляющем большинстве природных и технологических сред, в которых эксплуатируется металлическое оборудование и конструкции[1].

Установлено, что процесс образования язв и питтингов сопровождается следующими явлениями: электрической пробой пассивирующих пленок на металлах и сплавах; отслоение и разрушение поверхностной окисной пленки на металле водородом, выделяющимся под пленкой; выделение газа; флуктуации процесса коррозии, связанного с хаотичным протеканием конкурирующих процессов разрушения и образования защитной пленки [2, 3]. Все эти явления могут генерировать акустические сигналы.

Ранее при помощи численного моделирования и непрерывного вейвлет-анализа было обнаружено [4, 5], что при распространении АЭ сигнала в пластине в основном преобладают A_0 - и S_0 - моды волн Лэмба, причем при расположении дефекта вблизи центра пластины (на глубине около 50%) преобладает S_0 мода, а при расположении дефекта вблизи любой их двух поверхностей (на глубине около 0% или около 100%) преобладает A_0 мода. При этом на вейвлет-преобразовании максимумы, соответствующие A_0 - и S_0 - модам, приходятся на разные частоты.

В нашей работе предпринята попытка исследовать возможность применения описанного способа для АЭ мониторинга язвенной коррозии путем выявления АЭ сигналов, соответствующих процессу проникновения коррозионного повреждения вглубь материала.

Чтобы воспроизвести механизм повреждения в лабораторных условиях, было выполнено испытание специально подготовленных образцов из углеродистой стали в 1%-ом растворе серной кислоты. В ходе работы была определена зависимость доли энергии

симметричной моды от стадии развития язвенной коррозии.

Постановка эксперимента

Как показывает практика, технологическое оборудование, изготовленное из сталей 10, 20, 09Г2С, 10Г2, 17ГС, удовлетворительно эксплуатируются в некоррозионно-активных средах (чистая нефть, чистый газ). В тоже время, эти марки сталей наиболее распространены в эксплуатационной практике оборудования, работающего в прямом контакте с коррозионно-активными средами, что неизбежно приводит к значительной повреждаемости от язвенной коррозии.

Для проведения исследовательской работы был выбран материал Сталь 20, как наиболее распространенный из представленных выше. Были изготовлены экспериментальные образцы, представляющие собой полосы размером 500x50x5мм.

В качестве коррозионно-активной среды использовался 1%-й раствор серной кислоты. Серная кислота, обладающая ионами SO_4^{2-} , позволяет значительно ускорить коррозионные разрушения. Реакция с серной кислотой сопровождается всеми основными процессами, характерными для коррозии:

1. газообразование (водород):
 - образование пузырька газа;
 - отрыв пузырька газа от поверхности металла;
 - разрушение пузырька после всплытия.
2. растрескивание металлургической окалины, образованной при производстве проката;

3. разъедание верхнего слоя основного металла;
4. разъедание подповерхностного, основного металла (центральная часть).

Эксперимент проводился на двух образцах. Для получения преимущественно симметричной моды волны Лэмба на образце №1 коррозии был подвержен участок с торца размером 10x1мм – поверхность среза образца (рис.1). Для получения преимущественно антисимметричной моды волны Лэмба на образце №2 коррозии была подвержена регулярная поверхность размером 30x10мм (рис.2).

Подготовка образцов осуществлялась следующим образом. Один конец каждого образца заливался расплавленным парафином, затем в парафине очищался участок для воздействия кислотой.

Регистрация АЭ сигналов осуществлялась многоканальной АЭ системой A-Line 32D (PCI-8). На каждый образец устанавливалось по три ПАЭ (рис.1 и 2). Были использованы широкополосные ПАЭ GT300 с полосой 100÷800кГц и широкополосные ПАЭ GT200 с полосой 30-500кГц. Применялись предусилители двух частотных диапазонов 30÷500кГц и 125÷500кГц для разделения коррозионных процессов.

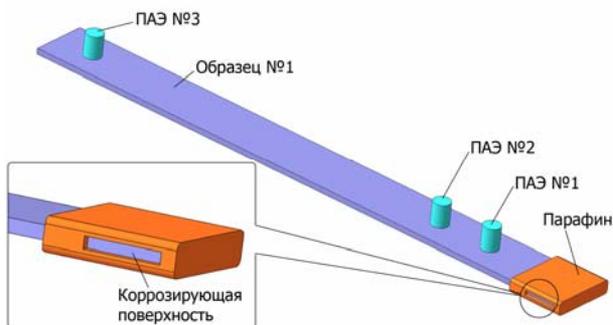
Эксперимент проводился при следующих настройках АЭ системы: коэффициент усиления предусилителя 26дБ, порог дискриминации 35дБ.

Образцы устанавливались в отдельные емкости, в которые затем заливался 1%-ый раствор серной кислоты. Наблюдение и регистрация АЭ сигналов производились на протяжении восьми

суток.

Для анализа коррозионного повреждения использовались осциллограммы АЭ сигналов и их частотные спектры.

а)



б)

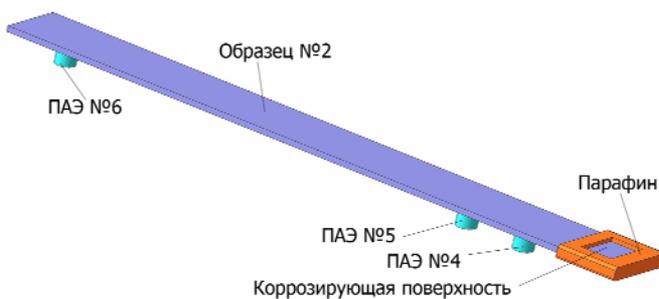


Рис.1. а) образец №1 с поверхностью среза для коррозионных испытаний.;

б) образец №2 с регулярной поверхностью для коррозионных испытаний.

ПАЭ№1, №4 – GT300 (частотный фильтр предусилителя 30-500 кГц)

ПАЭ№2, №5 – GT200 (частотный фильтр предусилителя 125-500 кГц)

ПАЭ№3, №6 – GT200 (частотный фильтр предусилителя 30-500 кГц)

Анализ результатов

Для анализа большого количества осциллограмм вместо

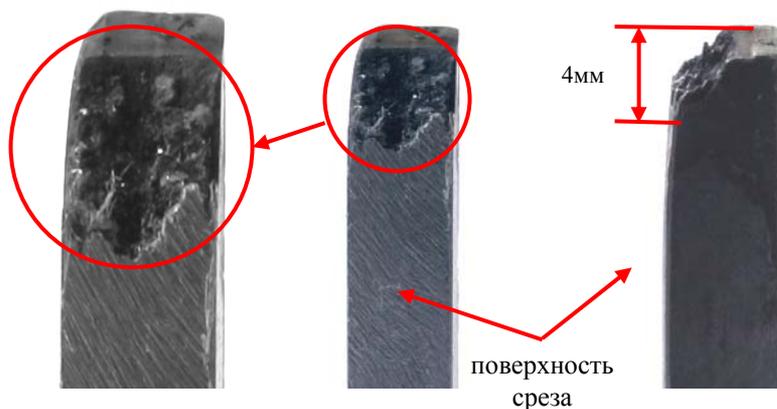


Рис.3. Разрез образца №1 с коррозионным повреждением

Эксперимент с образцом №2 можно разделить на три этапа.

Первый этап длился примерно 2 часа и сопровождался значительным количеством АЭ сигналов (около 50%) с высокочастотной составляющей. Визуально установлено, что эти сигналы вызваны растрескиванием и отслоением металлургической окалины на поверхности образца.

Второй этап следовал за первым и характеризовался увеличением общего количества сигналов более чем на два порядка и полным отсутствием сигналов с высокочастотной составляющей. Длился второй этап приблизительно трое суток.

На третьем этапе происходило зарождение и развитие язвенной коррозии. Этот этап характеризовался появлением высокочастотной составляющей в АЭ сигналах, причем по мере роста дефекта увеличивались как количество высоко-частотных сигналов, так и характерная доля высокочастотной составляющей. Нарастание доли высоко-частотной составляющей АЭ сигналов с

ростом дефекта продемонстрировано на рис.4. При толщине стенки образца 5мм, максимальная глубина дефекта составляла 2мм, а максимальная доля энергии сигнала в диапазоне 300-500кГц достигла 91% (рис.4г). На рис.5 представлен разрез образца №2 с коррозионным повреждением.

Амплитуды всех сигналов АЭ с высокочастотной составляющей на образцах №1 и №2 лежали в диапазоне 36÷46дБ.

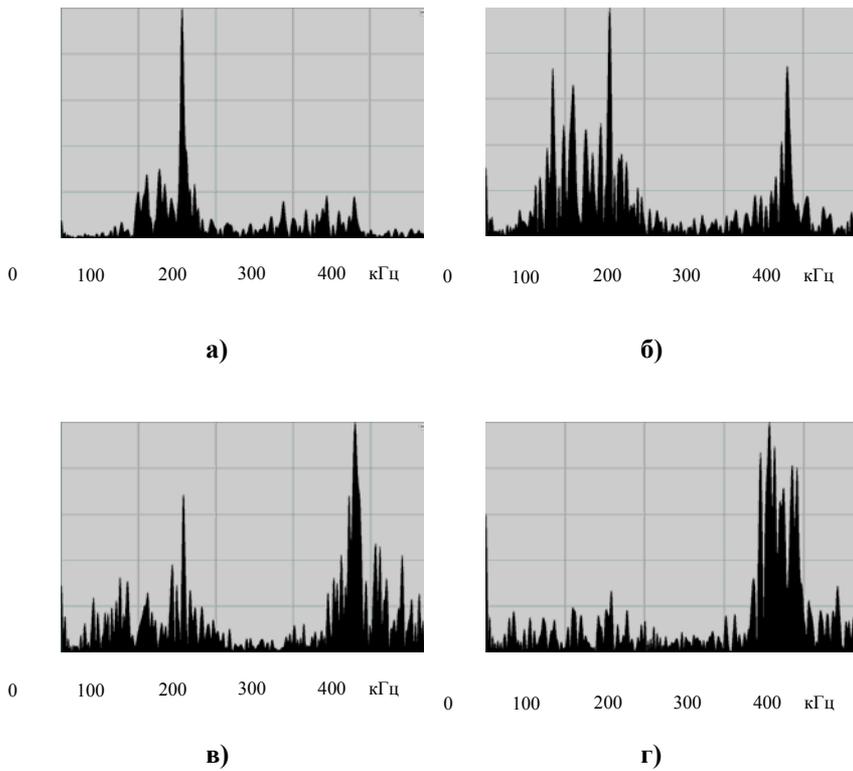


Рис.4. Увеличение доли высокочастотной составляющей АЭ сигналов с ростом язвенного повреждения

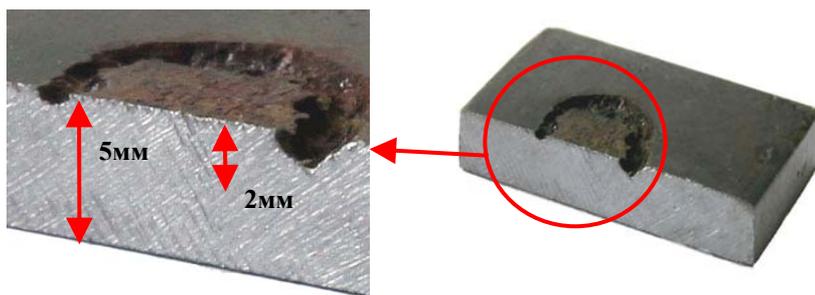


Рис.5. Разрез образца №2 с коррозионным повреждением

Полученные результаты согласуются с результатами численного моделирования в статье [4]. В данной работе источник, расположенный в середине пластины, излучал преимущественно симметричную моду с максимумом на вейвлете на частоте 522 кГц, а по мере приближения источника к поверхности пластины энергия симметричной моды уменьшалась, и большая часть энергии переносилась антисимметричной модой с максимумом на вейвлете на частоте 50 кГц.

Заключение

Результаты эксперимента показали, что в высокочастотной составляющей АЭ сигналов заключена информация как о разрушении оксидной пленки на поверхности образца, так и о проникновении язвенной коррозии вглубь материала.

При разрушении оксидной пленки АЭ сигналы всегда имели, помимо высокочастотной, низкочастотную составляющую.

При проникновении язвенной коррозии вглубь материала происходило постепенное снижение энергии низкочастотной составляющей и постепенное нарастание энергии высокочастотной

составляющей АЭ сигналов. Предположительно, АЭ сигналы, обладающие только высокочастотной составляющей, приходили с глубины 50%.

Таким образом, можно судить о том, что метод АЭ, способен фиксировать глубину проникновения язвенной коррозии и производить оценку скорости ее развития.

Предполагается, что с помощью анализа высокочастотной составляющей АЭ сигналов возможно определение других видов локальных коррозионных повреждений, таких как: питтинговая коррозия, коррозионное растрескивание, межкристаллитная коррозия и др.

Список литературы

1. Семенова И.В., Хорошилов А.В., Флорианович Г.М. Коррозия и защита от коррозии / Под ред. И.В. Семеновой. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2006. – 376 с.
2. Баранов В.М., Губина Т.В. Применение акустической эмиссии для исследования и контроля коррозионных процессов: Учебн. пособие. М.: МИФИ, 1990. 72 с.
3. Неразрушающий контроль: Справочник: В 7 т. Под общ. ред. В.В.Клюева. Т.7: В 2 кн. Кн.1: В.И. Иванов, И.Э. Власов. Метод акустической эмиссии / Кн. 2: Ф.Я. Балицкий, А.В. Барков, Н.А. Баркова и др. Вибродиагностика. – М.: Машиностроение, 2005. – 829 с.: ил.
4. Hamstad, M. A., A. O’Gallagher and J. Gary, “Examination of the Application of a Wavelet Transform to Acoustic Emission Signals: Part 1. Source Identification”, *Journal of Acoustic Emission*, 20, 2002, 39-61.
5. Hamstad, M. A., A. O’Gallagher and J. Gary, “Examination of the Application of a Wavelet Transform to Acoustic Emission Signals: Part 2. Source Location”, *Journal of Acoustic Emission*, 20, 2002, 62-81.

АВТОМАТИЗИРОВАННЫЙ МЕТОД АНАЛИЗА ДАННЫХ АКУСТИКО-ЭМИССИОННОГО КОНТРОЛЯ

В.А. Барат, А.Л. Алякритский
(ООО «ИНТЕРЮНИС», г. Москва)

Введение

Каждый акт акустической эмиссии характеризует уникальное акустическое событие, произошедшее в определенной точке контролируемого объекта. По мере распространения волн акустической эмиссии от места излучения до первичного преобразователя волновая картина усложняется за счет преобразований различных типов волн, множественности путей распространения, за счет дисперсии скорости распространения волн по частоте. В результате, преобразователь акустической эмиссии регистрирует сложный многокомпонентный сигнал, который несет информацию не только об акустическом событии, породившем данный сигнал, но и в большей степени о параметрах акустического и электрического тракта. В связи с этим, построение аналитической или даже численной диагностической модели для интерпретации сигналов акустической эмиссии оказывается сложной и нетривиальной задачей, решение которой не может быть обобщено для различных видов контролируемого оборудования. В случае, когда интерпретация данных на основании точных

диагностических моделей оказывается затруднительной, приемлемой альтернативой является статистический анализ, позволяющий с высокой степенью достоверности проводить интерпретацию и классификацию данных. В настоящее время статистические методы анализа данных широко применяют как в промышленных акустико-эмиссионных системах, так и при лабораторных исследованиях, способы применения весьма разнообразны: кластеризация данных, корреляционный анализ, проверка различных статистических гипотез.

В данной работе представлен статистический метод анализа, позволяющий проводить автоматическую кластеризацию данных акустико-эмиссионного контроля. Данный метод позволяет обрабатывать большие объемы данных, полученных в результате акустико-эмиссионного контроля или при лабораторных исследованиях при полном отсутствии априорной информации. В результате обработки данные структурируются и организуются, каждый кластер, сформированный в результате анализа, характеризует источник акустической эмиссии на определенной стадии развития.

Общее описание метода

Кластеризация данных акустической эмиссии в настоящее время применяется достаточно часто, однако, несмотря на схожесть математического аппарата различные методы обработки данных, преследуют различные цели, имеют характерные особенности реализации [5,6,8,9]. Основными особенностями данного метода

является, во-первых, возможность проведения обработки данных в автоматическом режиме, с минимальным участием оператора и минимальным количеством настроечных параметров, и, во-вторых, возможность анализа в рамках одного алгоритма разнородной диагностической информации.

Исходными данными для алгоритма, реализующего представленный метод, могут выступать как сигналы акустической эмиссии, так и их отдельные параметры, вычисленные при сборе данных в режиме on-line. Даже если скорость счета акустической эмиссии такова, что по техническим причинам сбор первичной диагностической информации в полном объеме невозможен, более половины сигналов акустической эмиссии могут быть заменены значениями отдельных параметров (временем прихода, временем нарастания, энергией, и.т.д.) без ущерба для точности обработки.

Алгоритм метода представлен на рис. 1. Обработка данных осуществляется в два этапа. На первом этапе происходит кластеризация сигналов акустической эмиссии, причем данные, зарегистрированные каждым измерительным каналом, анализируются по отдельности. В качестве меры схожести каждой пары сигналов используется коэффициент корреляции. В результате первого этапа формируются «классы сигналов».

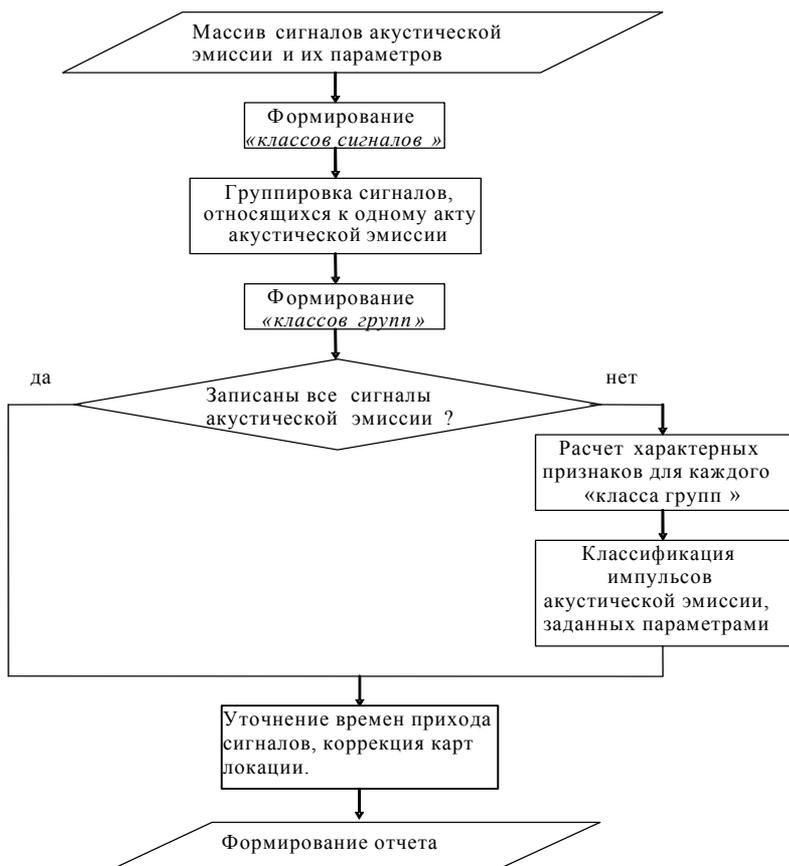


Рис. 1. Алгоритм автоматизированного метода статистической обработки данных

Затем классифицированные сигналы объединяются в группы, таким образом, чтобы в одну группу входили сигналы различных измерительных каналов, относящиеся к одному акустическому событию. Следующим этапом алгоритма является формирование «классов групп», к одному «классу групп» относят те группы, в которых сигналы, зарегистрированные одними и теми же измерительными каналами, соответствуют одним и тем же

«классам сигналов». Количество и характеристики предполагаемых источников акустической эмиссии оцениваются на основании результатов классификации групп сигналов.

В случае если часть импульсов акустической эмиссии характеризуется только параметрами, а реализации сигналов отсутствуют, «классы сигналов» и «классы групп» формируются на основании неполной диагностической информации. Для классификации импульсов акустической эмиссии, заданных только своими параметрами, каждый «класс групп» характеризуется набором признаков, входящих в перечень определяемых параметров импульса. Классификация импульсов акустической эмиссии, для которых отсутствует первичная диагностическая информация, осуществляется на основании многомерной эмпирической функции распределения, построенной для этих признаков.

Кластеризация сигналов акустической эмиссии.

Для кластеризации сигналов акустической эмиссии необходимо определить способ вычисления меры схожести, на основании которой происходит объединение или не объединение сигналов в кластер [4]. Для того чтобы погрешность оценки АЭ параметров не влияла на результат классификации, в качестве меры схожести двух сигналов был использован коэффициент корреляции сигналов, соответствующий максимуму их взаимной корреляционной функции (1). Предварительный анализ показал, что, сигналы соответствующие одному и тому же источнику акустической

эмиссии и зарегистрированные одним и тем же измерительным каналом, имеют высокий коэффициент взаимной корреляции, величина которого зависит от характера процесса вызвавшего эмиссию.

$$r = \frac{\sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})^2} \sqrt{\sum_{i=1}^N (y_i - \bar{y})^2}} \quad (1)$$

Используя коэффициент корреляции в качестве меры близости при кластерном анализе акустико-эмиссионных сигналов, можно проводить автоматическую коррекцию времен прихода сигналов, принадлежащих одному кластеру, поскольку кросскорреляционная функция достигает максимума в момент времени соответствующий разности времен прихода импульсов акустической эмиссии.

При обработке больших массивов данных расчет коэффициентов корреляции для всех пар сигналов приводит к существенным (значительным) временным затратам, чтобы ускорить обработку данных можно применить вейвлет декомпозицию, а именно разложение сигнала по вейвлет – пакетам [3]. Разложение по вейвлет пакетам – одна из разновидностей кратномасштабного анализа, представляет собой разложение сигнала по базису вейвлетов (в общем случае по базису Рисса), заданных для последовательности замкнутых вложенных друг в друга подпространств

$$w_{2n}(x) = \sqrt{2} \sum_k h(k) w_n(2t - k) \quad (2)$$

$$w_{2n+1}(x) = \sqrt{2} \sum_k g(k) w_n(2t - k),$$

где $g(k) = (-1)^k h(1 - k)$ определяется типом вейвлетной функции.

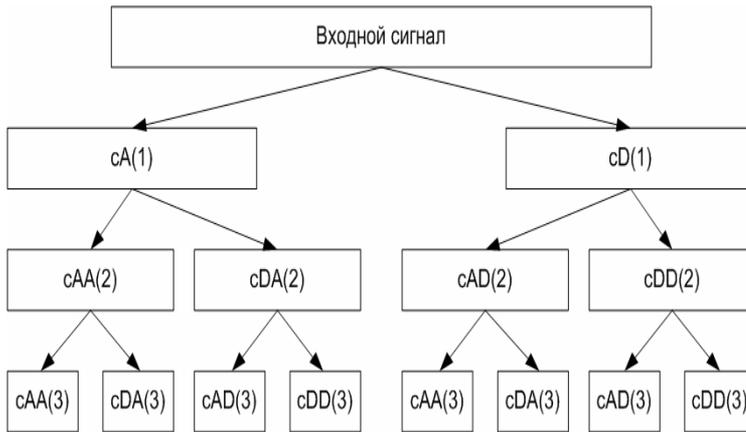


Рис. 2. Вейвлет-пакетное разложение

Схема пакетного разложения показана на рис. 2, как и при дискретном вейвлет преобразовании осуществляется разложение сигнала на низкочастотную составляющую – аппроксимацию, и высокочастотную – детализацию, на следующем уровне декомпозиции подвергается как аппроксимация, как и детализация. Таким образом, j -м уровне разложения вычисляются 2^j коэффициентов, причем коэффициент (j,k) локализует энергию в диапазоне частот (3), где Ω_0 частота, соответствующая половине частоты дискретизации

$$\Delta\Omega = \left(\frac{\Omega_0}{2^j} k, \frac{\Omega_0}{2^j} (k+1) \right) \quad (3)$$

Как правило, энергия АЭ сигнала распределяется по спектру неравномерно, и для локализации 95-99% энергии зачастую оказывается достаточно 3-5 коэффициентов пакетной декомпозиции. Причем размерность информативных составляющих, как правило, по меньшей мере, в 4 раза меньше, чем у исходного сигнала. Исследования показали, что точность оценки коэффициента корреляции на основании взвешенной суммы коэффициентов корреляции составляющих вейвлет-пакетной декомпозиции составляет 85%.

После определения меры схожести сигналов акустической эмиссии необходимо установить правило объединения кластеров, содержащих схожие сигналы. Поскольку при кластеризации сигналов акустической эмиссии количество кластеров соответствует количеству предполагаемых источников акустической эмиссии, при проектировании алгоритма кластеризации особое внимание было уделено правильному определению количества кластеров. Для достижения поставленной цели была предложена двухступенчатая схема кластеризации. Блок-схема алгоритма кластеризации показана на рис.3. На первом этапе применяется иерархический алгоритм, при котором изначально каждый сигнал считается кластером, а затем на каждом шаге объединяются два кластера с минимальным расстоянием. При определении межкластерного расстояния использовалось правило «Complete-link», при котором объединяются кластеры с

наименьшим расстоянием между двумя наиболее удаленными представителями.



Рис. 3. Блок-схема алгоритма кластеризации осциллограмм

На втором шаге применяется итерационный анализ, рассчитываются расстояния между центрами масс образовавшихся кластеров, и объединяются два кластера, у которых расстояние между центрами кластеров, максимально и превышает пороговое значение. После этого осуществляется рекластеризация методом k -средних.

При такой схеме построения алгоритма кластеризация получается гибкой и управляемой, в ней используются два настроечных параметра – пороговое значение для присоединения сигнала к кластеру (при иерархической кластеризации) и пороговое значение для межкластерного расстояния. Значения настроечных

параметров выбираются на основании информации об объекте и условиях контроля.

Кластеризация групп сигналов акустической эмиссии

На следующем этапе алгоритма анализируются группы сигналов, соответствующие одному и тому же акустическому событию. Для формирования подобных групп анализируются времена прихода импульсов акустической эмиссии, разность времен регистрации первого и последнего импульса в группе не должна превышать заданного значения, которое определяется отношением его максимального габаритного размера и минимальной скорости распространения волн акустической эмиссии, экспериментально определенной для данного объекта контроля. Импульс, который выходит за рамки временного окна, является начальным для следующей группы.

К одному «классу групп» относят те группы, в которых сигналы, зарегистрированные одними и теми же измерительными каналами, соответствуют одним и тем же классам сигналов. Исследования алгоритма показали, что для отнесения группы сигналов к тому или иному классу достаточно, чтобы классы сигналов совпадали хотя бы для двух каналов в группе.

Принадлежность к «классам групп» можно также определить для импульсов акустической эмиссии, даже при отсутствии информации о форме сигнала акустической эмиссии, заданных только своими параметрами. Для этого, каждый полученный «класс групп» характеризуется значениями признаков, являющихся

медианой выборочного распределения по каждому классу. Список признаков приведен в Таблице 1.

Таблица 1

№	название признаков
1	номера трех каналов с минимальным временем прихода сигналов $\{n_{t_1}, n_{t_2}, n_{t_3}\}$
2	номера трех каналов с максимальной амплитудой сигналов $\{n_{a_1}, n_{a_2}, n_{a_3}\}$
3	максимальное значение амплитуды сигналов в группе A_{max}
4	отношение амплитуд сигналов, зарегистрированных по каналам n_{t_2} и n_{t_1} , а также n_{t_3} n_{t_1} $\{A_{21}$ и $A_{31}\}$

Принадлежность группы сигналов тому или иному классу определяется также как в методе k -средних, минимальным расстоянием между признаками, характеризующими каждый «класс групп» и анализируемую группу признаков.

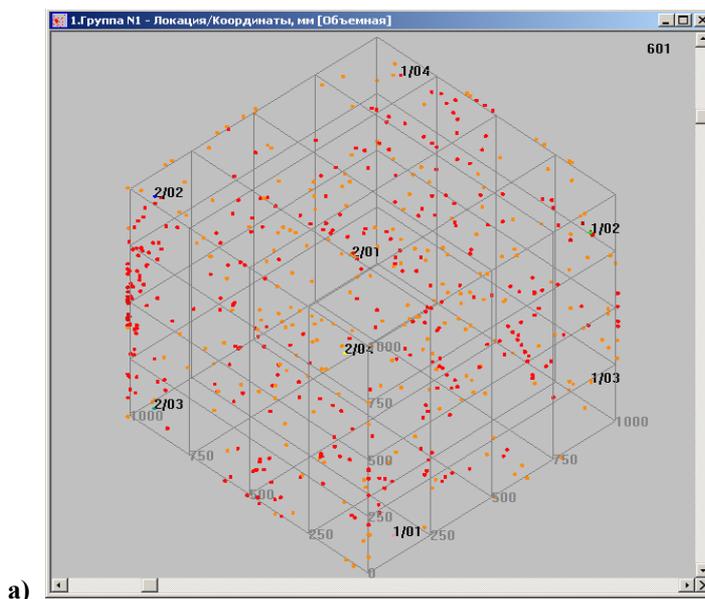
Полученные таким образом «классы групп» с высокой степенью вероятности характеризуют потенциальные источники акустической эмиссии. Количество «классов групп» соответствует количеству источников акустической эмиссии, номера каналов, по которым зарегистрированы сигналы с наименьшим временем прихода, определяет номер зоны локации. Количество групп в каждом классе, и энергия входящих группу импульсов, могут характеризовать класс опасности источника.

Результаты

Эффективность данного метода можно наглядно подтвердить при помощи практических примеров. Для исследования закономерностей акустической эмиссии в бетоне был проведен ряд

экспериментов. На бетонном кубе, с длиной стороны равной одному метру, были установлены восемь преобразователей акустической эмиссии – по одному у каждой вершины. Преобразователи акустической эмиссии использовались как для измерения сигналов акустической эмиссии, так и в режиме генерации – для имитации источников акустической эмиссии.

Из множества экспериментов для иллюстрации преимуществ представленного метода были выбраны два. В первом необходимо было обнаружить источник акустической эмиссии, имитируемый генератором импульсов акустической эмиссии, на фоне механического шума, который создавался при помощи ударов молотком по бетонному кубу. На рис.4а показан результат объемной локации источников на основании зарегистрированных сигналов акустической эмиссии.



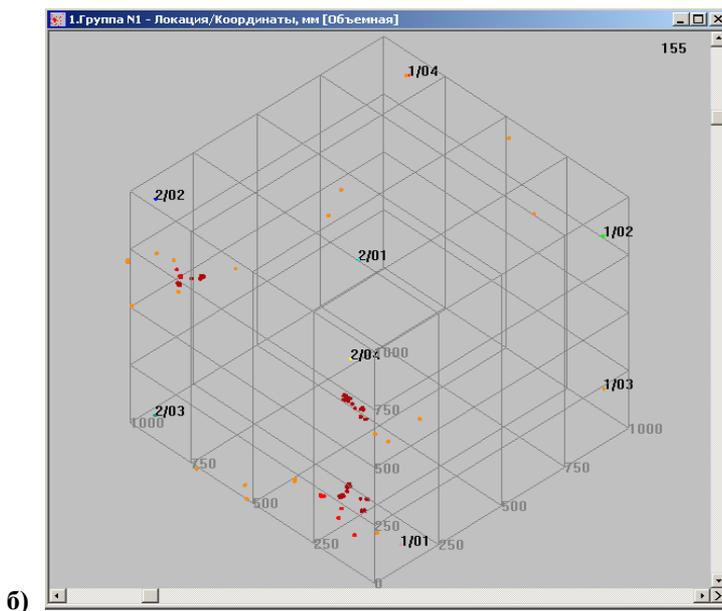


Рис.4. Результаты объемной локации источников АЭ на бетонном кубе.

Индикации, рассеянные по всему полю локации, создаются источником механического шума, при этом определение местоположения источника акустической эмиссии также оказывается невозможным. Применение статистического метода анализа данных позволяет не только сформировать «класс групп» импульсов акустической эмиссии, излучаемых имитатором, но и выделить в отдельный класс сигналы, соответствующие ударам молотка. Результаты работы приведены в Таблице 2а, признаки, указанные в таблице соответствуют перечню, указанному в Таблице 1.

Таблица 2а

№ класса	Количество элементов в классе	N_A ₁	N_A ₂	N_A ₃	A _{max}	N_T ₁	N_T ₂	N_T ₃
1	47	2	7	1	7805	2	4	5
2	55	7	2	1	2048 0	6	7	1

Второй эксперимент состоял в том, что в трех точках на поверхности куба при помощи имитатора импульсов акустической эмиссии и источника Су-Нильсена поочередно генерировались акустические волны. На рис.4б показан правильный результат объемной локации источников акустической эмиссии. При статистической обработке данных, при помощи представленного метода, можно получить шесть классов событий, соответствующих двум разным источникам акустической эмиссии в трех точках на поверхности исследуемого объекта.

Таблица 2б

№ класса	Количество элементов в классе	N_A ₁	N_A ₂	N_A ₃	A _{max}	N_T ₁	N_T ₂	N_T ₃
1	24	7	6	1	1980	6	7	1
2	23	7	6	2	2000	6	7	1
3	24	7	1	2	5593	8	1	6
4	26	7	1	2	2195	8	1	7
5	24	1	7	3	3659	1	7	3
6	22	1	7	3	6393	1	7	3

Еще одним полезным применением данного метода является структурирование и сжатие данных. Например, при экспериментальном исследовании акустической эмиссии при развитии питтинговой коррозии было зарегистрировано несколько сотен тысяч сигналов, после статистического анализа данных в автоматическом режиме без предварительной обработки было выделено около двадцати представительных классов «групп импульсов», характеризующих различные стадии развития коррозионного повреждения [7].

Среди практических приложений наиболее целесообразно упомянуть применение автоматизированного метода статистического анализа для обработки данных акустико-эмиссионного мониторинга, когда необходимо анализировать изменения структуры сигналов АЭ, регистрируемых в течение длительного периода времени, а также в случае контроля сложных промышленных объектов, для которых, оказывается, сложно подобрать приемлемую схему локации.

При использовании коэффициента корреляции в качестве меры близости при кластерном анализе акустико-эмиссионных сигналов, можно проводить автоматическую коррекцию времен прихода сигналов, принадлежащих одному кластеру, поскольку кросскорреляционная функция достигает максимума в момент времени соответствующий разности времен прихода импульсов акустической эмиссии.

Заключение

В данной работе описан автоматизированный метод статистического анализа данных, позволяющий структурировать данные акустико-эмиссионного контроля, объединяя в различные кластеры группы сигналов, характеризующие различные источники акустической эмиссии. Основными особенностями данного метода является, во-первых, возможность проведения обработки данных в автоматическом режиме, с минимальным участием оператора и минимальным количеством настроечных параметров, и, во-вторых, возможность анализа в рамках одного алгоритма разнородной диагностической информации.

На основании результатов статистического анализа можно уточнить количество источников акустической эмиссии, провести их зонную локацию, получить дополнительные оценки критерии опасности каждого источника, не прибегая к предварительной локации.

Список литературы

1. В.А.Барат, А.Л.Алякритский. Статистический метод обработки сигналов акустической эмиссии и их параметров для повышения достоверности результатов контроля. // Сборник трудов 17-й Российской научно-технической конференции. Неразрушающий контроль и диагностика. Екатеринбург, 2005. (на CD-ROM)
2. Слесарев Д.А., Барат В.А. Применение вейвлет-преобразования для анализа сигналов с импульсными составляющими. // Измерительная техника 2000. - № 8. - с. 43 – 46.

3. Дремин И.М., Иванов О.В., Нечитайло В.А. Вейвлеты и их использование. // Успехи физических наук, том 171, №5, 2001. 37р.
4. Айвазян С.А., Енюков И.С., Мешалкин Л.Д., Бухштабер В.М., Прикладная статистика в 3-х частях. М.: Финансы и статистика, 1989.
5. Л.Н. Степанова, А.Е. Кареев. Разработка метода динамической кластеризации сигналов акустической эмиссии для повышения точности их локализации. // Контроль. Диагностика, 2003, №6, с. 15-20.
6. A. A. Anastassopoulos, T. P. Philippidis. Clustering Methodologies for the evaluation of AE from Composites// Journal of Acoustic Emission, Vol. 13, Noa 1/2, 1995, pp 11-21
7. Алякритский А.Л., Попков Ю.С., Сорокин Е.Ю., Терентьев Д.А. Определение глубины язвенной (питтинговой) коррозии и слежение за ее развитием методом акустической эмиссии. // Труды научно-технической конференции. Акустическая эмиссия. Достижения в теории и практике.
8. Vallen VisualAE™. The standard in Acoustic Emission software. Vallen-Systeme GmbH. <http://www.vallen.de>
9. AE-Studio. НПФ Диатон. http://www.diatontest.ru/ae_studio.htm

ОПЫТ СЕРТИФИКАЦИИ СПЕЦИАЛИСТОВ ПО МЕТОДУ АЭ

Н.П. Бирюкова, к.т.н., с.н.с, В.И. Карпов, с.н.с,

С.В. Мешкова, с.н.с.

(ООО «НУЦ «Качество», г. Москва)

Надежность и достоверность оценки технического состояния, работоспособности и промышленной безопасности опасных производственных объектов и сооружений в значительной мере обеспечивается результатами неразрушающего контроля. Особое место среди них занимает метод АЭ, который позволяет произвести не только контроль, но и техническое диагностирование, получить оперативную информацию о текущем состоянии оборудования и организовать на предприятии систему мониторинга для предотвращения техногенных аварий и обеспечения безопасной, ресурсосберегающей эксплуатации оборудования.

Основными факторами, определяющими результативность и эффективность неразрушающего контроля и диагностики, являются:

- ✓ технические средства и аппаратура контроля;
- ✓ нормативные и инструктивно-методические материалы на контроль различного вида объектов;
- ✓ квалификация и компетентность персонала.

По первому направлению в области акустической эмиссии в

России в настоящее время наметился существенный прогресс, можно приобрести как отечественные приборы, например A-Line, Малахит, так и зарубежные, например DISP и др.

Второму направлению – обеспечению нормативной и методической документацией – в текущий период уделяется недостаточное, на наш взгляд, внимание, работа в основном проводится по ОСТам, ГОСТам и инструкциям, разработанным в основном более 15 лет назад. По АЭ имеются всего несколько документов РД 03-300-99 «Требования к акустико-эмиссионной аппаратуре, используемой для контроля опасных производственных объектов», РД 03-300-99 «Требования к преобразователям акустической эмиссии, применяемым для контроля опасных производственных объектов», ПБ 03-593-03 «Правила организации и проведения акустико-эмиссионного контроля сосудов, аппаратов, котлов и технологических трубопроводов». Недостаточно отражена специфика контроля конкретных объектов, что существенно усложняет процесс обучения и подготовки специалистов.

Третье направление – персонал контроля и диагностирования – является важнейшим. Несмотря на все большую компьютеризацию и автоматизацию процессов контроля, все расширяющийся рынок средств и приборов, роль специалиста в оценке качества того или иного изделия или его фрагмента остается определяющей и, следовательно, тем выше требования к его компетенции и квалификации, от него же требуется способность разработки конкретных инструкций и технологических карт.

В основном знания и квалификация приобретаются с опытом.

Многолетний опыт сертификации персонала показывает, что одна группа специалистов хорошо знакома с физическими основами и параметрами контроля (в основном более молодые специалисты), но имеет небольшой опыт работы, другая группа при большом объеме практики не совсем правильно может осмыслить основы процесса, что в обоих случаях может привести к ошибкам и снижению достоверности результатов.

Это обуславливает важную роль процесса подготовки, повышения квалификации и оценки квалификационного уровня специалиста, соответствия его уровня определенным требованиям, в том числе – знание особенностей конструкций, их потенциально опасных областей, нормативных требований к объектам.

Основанием допуска к работе должен быть квалификационный уровень специалиста. Профессиональная компетентность в области неразрушающего контроля является объектом оценки, а сертификация (аттестация) третьей стороной – форма подтверждения соответствия.

Обучение и подготовка проводится преимущественно центрами, имеющими Лицензию Департамента образования.

Сертификация, т.е. оценка соответствия уровня квалификации специалистов установленным требованиям, проводится аккредитованными Независимыми органами и их Экзаменационными центрами.

К выбору Независимого органа по сертификации или Экзаменационного центра следует относиться внимательно, изучив, кем он аккредитован и совпадает ли область аккредитации с

требованиями Заказчика.

Позитивно, если Независимый орган имеет международную аккредитацию, имея право проводить аттестацию с выдачей сертификатов, признанных за рубежом.

Процесс сертификации состоит из 3 этапов:

1. Обучение, подготовка, включающие: теоретические занятия, отражающие физические основы метода и определяющие его основные параметры. Ознакомление с технологией контроля, разработка технологических карт и рабочих инструкций; практические занятия на одном – двух видов оборудования, ознакомление с нормативными документами по соответствующему методу.
2. Сдача квалификационных экзаменов:
 - общего – письменный экзамен по физическим основам, основным закономерностям и параметрам определенного метода НК;
 - специальных экзаменов – письменный экзамен по технологии контроля, применяемой в конкретном секторе, по знаниям особенностей конструкции и эксплуатации контролируемой продукции а также, применяемых стандартов и других нормативных и методических документов, технических условий и критериев приемки изделий;
 - практического экзамена – экзамен, на котором претендент демонстрирует знание необходимого оборудования и средств контроля, умение проводить неразрушающий контроль, способность выявлять и оценивать дефекты.

3. Финальной частью экзаменов является собеседование, проводимое экзаменационной комиссией из 2-х или 3-х специалистов III, высшего уровня квалификации, где специалист окончательно подтверждает свою квалификацию и имеет возможность получить ответы на оставшиеся для него неясными вопросы. Аналога нет ни в одной зарубежной системе.

Все эти части имеют особое значение для кандидата на сертификацию по АЭ, т.к. не зная основ волновой теории сложно правильно интерпретировать результаты контроля.

Серьезным негативным фактором в области обучения и подготовки является отсутствие аппаратуры во многих органах по сертификации и необходимость проведения практических занятий на базах ведущих организаций по АЭ. Это не дает возможности обеспечить всем учащимся одинаковые условия из-за занятости или отсутствия специалистов организаций, проводящих занятия, и ограниченных по времени (1-2 дня).

Большинство кандидатов недостаточно знакомы с оборудованием, поэтому желательно чтобы признанным органам по сертификации предоставлялась ведущими производителями аппаратура во временное пользование или в лизинг для дополнительных предварительных занятий, не отменяя посещения кандидатами базовых организаций.

Повышение эффективности подготовки специалистов резко повысится, если ведущие организации возьмут на себя труд по разработке методических рекомендаций, аналогичных ряду

документов, изданных в 2006 году по методам ВК, МК, ТК, ПВК (РД-13-03-2006, РД-13-05-2006, РД 13-04-2006, РД 13-06-06 «Методические рекомендации о порядке ПВК технических устройств и сооружений, применяемых и эксплуатируемых на опасных производственных объектах»), а также единое учебное пособие, которое раздавалось бы специалистам как справочный материал по окончании курса.

Органам по сертификации, аккредитованным на право проведения АЭ, целесообразно объединиться в работе по актуализации сборников вопросов, которые существуют более 15 лет, согласовав их с программой обучения, учебным пособием и новыми достижениями в области АЭ.

Предполагается, что этот вопрос будет более подробно рассмотрен в работе Школы-семинара «Сертификация в области НК – 2008» с 29.09 по 4.10. 2008г.

МЕТОДИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ КАЛИБРОВКИ ПРИ АЭ-КОНТРОЛЕ

С.П. Быков, А.В. Юшин
(ОАО «ИркутскНИИХиммаш»)

Процедура подготовки к АЭ-контролю, какого либо изделия (объекта), обязательно включает калибровку или определение главных акустических характеристик объекта: скорости распространения акустических сигналов и затухания.

Большое влияние на результаты калибровки оказывают: характеристики имитатора (способ создания возмущения, повторяемость и т.п.), соотношение размерных характеристик возмущения и объекта контроля (длина волны – толщина), а так же способ регистрации импульса.

Наиболее распространенными имитаторами сигналов АЭ, широко используемыми на практике являются: источник Су-Нильсена (карандашный грифель или стеклянный капилляр с определенными свойствами) и ПАЭ, работающий на излучение.

Исследована возможность имитации сигналов АЭ электромагнитным способом, а также при разрушении стеклянного капилляра, заполненного водой при нагревании или при резком охлаждении.

В практике АЭ контроля, как правило, используется диапазон регистрируемых частот от 50 до 500 кГц. При этом выполняются

условия возникновения нормальных волн с вертикальной поляризацией (волны Лэмба).

Вопрос правильного измерения скорости связан с точностью определения координат источника излучения и выбором расстояния между ПАЭ в локационной группе. С увеличением расстояния между ПАЭ растет точность определения скорости и следовательно точность определения координат.

Предложена вейвлет-технология получения дисперсионной кривой зависимости скорости (A_0 , S_0) от соотношения длины волны и толщины стенки объекта по одному зарегистрированному импульсу.

С другой стороны, расстояние между ПАЭ определяется величиной ослабления сигнала при прохождении по объекту. При АЭ контроле реальных объектов имеет смысл говорить именно об общем ослаблении сигнала, связанным с особенностями конструкции объекта и типом возбуждаемых АЭ излучением волн.

Зная функцию ослабления, можно не только правильно выбрать расстояние между ПАЭ при АЭ контроле, но и построить алгоритм оценки местоположения источника по разнице амплитуд импульса, пришедшего на оба ПАЭ, как из линейной локационной группы, так и из-за ее пределов. Разумеется, что оценка координат может быть сделана с точностью до ширины протяженного объекта и должна расцениваться, как дополнительная информация для фильтрации ложных либо неинформативных событий, зарегистрированных и локализованных при пороговом обнаружении.

ОСОБЕННОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ МЕТОДА АКУСТИЧЕСКОЙ ЭМИССИИ ДЛЯ КОНТРОЛЯ КАМЕР ПРИЕМА-ЗАПУСКА ОЧИСТНЫХ УСТРОЙСТВ И СРЕДСТВ ВНУТРИТРУБНОЙ ДЕФЕКТΟΣКОПИИ МАГИСТРАЛЬНЫХ ГАЗОПРОВОДОВ

*Д.В. Важенин, Д.В. Кузьмин, С.И. Безгодов, В.В. Коннов
(ЗАО НПЦ «МОЛНИЯ», г. Москва)*

В состав магистральных газопроводов (МГ) включены камеры приема-запуска очистных устройств и средств внутритрубной дефектоскопии.

Камера приема-запуска представляет собой сосуд, работающий под давлением магистрального газопровода, одна сторона которого подсоединена к магистральному газопроводу, другая снабжена концевым затвором со съемной крышкой.

Для предотвращения возможного разрушения элементов концевого затвора газотранспортным обществам рекомендовано не реже одного раза в два года проводить техническое освидетельствование камер приема-запуска.

Специалисты ЗАО НПЦ «МОЛНИЯ» проводят эту работу, сочетая традиционные методы контроля (ВИК, УК, ПВК, РК) с методом акустической эмиссии (АЭ).

Целесообразность применения АЭ-контроля обусловлена следующим:

- интегральностью метода, обеспечивающего 100%-ный контроль всего объекта;
- ограниченной пригодностью элементов концевой затвора к контролю традиционными методами.

При проведении контроля была использована схема установки датчиков на основных несущих элементах концевой затвора в режиме зонной локации и схема установки датчиков на корпус камеры в режиме линейной локации.

Нагружение объекта проводилось рабочей средой ступенчато, давлением в диапазоне от атмосферного до рабочего давления МГ.

В результате АЭ-контроля получены следующие результаты:

- выявлены активные источники акустической эмиссии, вызванные истечением рабочей среды через неплотности в запорной арматуре и резьбовых соединениях штуцеров (устранены в ходе обследования);
- установлено отсутствие активных источников акустической эмиссии, характерных для развивающихся дефектов, что было подтверждено другими методами контроля;
- выявлены пассивные источники акустической эмиссии, связанные с несплошностями на поверхности или в объеме стенки объекта контроля; наличие несплошностей на поверхности контролируемого объекта было подтверждено визуальным осмотром.

Применение АЭ при освидетельствовании камер приема - запуска в сочетании с традиционными методами контроля позволяет при минимальных затратах повысить выявляемость критических дефектов типа трещин, увеличить объем контроля до 100 %, оценить степень опасности дефектов, выявленных традиционными методами контроля, а также оценить герметичность соединений запорной арматуры.

**О ПРОВЕДЕНИИ И РЕЗУЛЬТАТАХ
НЕРАЗРУШАЮЩЕГО КОНТРОЛЯ СВАРНЫХ
СОЕДИНЕНИЙ ВНУТРЕННЕЙ ОБОЛОЧКИ
ИЗОТЕРМИЧЕСКОГО ХРАНИЛИЩА ЖИДКОГО
АММИАКА ВМЕСТИМОСТЬЮ 10000 ТОНН ОТДЕЛЕНИЯ
ЖИДКОГО АММИАКА КЕМЕРОВСКОГО ОАО «АЗОТ»**

*Н.Н. Губарев, Г.Д. Стенин
(Кемеровское ОАО «Азот», г. Кемерово)*

В октябре – ноябре 2005 года силами цеха по диагностированию опасных производственных объектов (ЦДОПО) управления по техническому надзору и диагностированию (УТНД) Кемеровского ОАО «Азот» был проведен неразрушающий контроль сварных соединений внутренней оболочки изотермического хранилища жидкого аммиака вместимостью 10000 тонн. По результатам контроля был проведен ремонт участков сварных соединений оболочки.

Необходимость проведения работ по неразрушающему контролю была обусловлена значительным повышением содержания аммиака в межстенном пространстве хранилища.

Краткая характеристика контролируемого объекта

В августе 2005 года при отборе проб было выявлено значительное повышение содержание аммиака в межстенном пространстве изотермического хранилища. Максимальное

содержание аммиака было зафиксировано в нижней части юго-восточного сектора.

Контролируемый объект – внутренняя оболочка изотермического хранилища жидкого аммиака вместимостью 10000 тонн.

Изотермическое хранилище представляет собой наземный стальной вертикальный резервуар, состоящий из внутренней и внешней оболочек. Внутреннее пространство между оболочками заполнено тепловой изоляцией. Хранилище закреплено на бетонном основании при помощи анкеров. Бетонное основание хранилища размещено на свайном поле внутри сплошного железобетонного ограждения – корпус 684/2 отделения жидкого аммиака цеха Аммиак-1.

Хранилище предназначено для хранения жидкого аммиака при следующих технологических параметрах:

	по паспорту	по технологическому регламенту
Рраб., МПа	0,008	0,0065
Траб., °С	минус 34	минус 34

Режим эксплуатации – непрерывный.

Межстенное пространство изотермического хранилища находится под азотным дыханием с избыточным давлением 0,0002 МПа.

Изотермическое хранилище оборудовано устройствами для отбора проб газовой среды из межстенного пространства.

В 2004 году ООО НПК «Изотермик» г. Москва выполнено полное техническое освидетельствование объекта, по результатам которого срок дальнейшей безопасной эксплуатации объекта определен до 1 октября 2012 года. К работе по техническому освидетельствованию объекта привлекались специалисты ЦДОПО УТНД КОО «Азот» г. Кемерово для проведения отдельных видов работ по неразрушающему контролю.

Программа неразрушающего контроля

Перед началом работ была разработана комплексная программа работ по неразрушающему контролю внутренней оболочки изотермического хранилища жидкого аммиака на основе положений [1, 2, 3].

Программой работ ставилась следующая цель – выявить причины повышения содержания аммиака в нижней части юго-восточного сектора межстенного пространства изотермического хранилища жидкого аммиака (сектор локализован на основе данных оперативной диагностики, представленных эксплуатационным персоналом).

Программой работ предусматривались следующие блоки контроля:

- визуальный контроль;
- диагностирование и дефектоскопия неразрушающими методами.

Диагностирование и дефектоскопия включали в себя следующие методы контроля и в указанном порядке (специально отмечено, что иной порядок проведения работ не допустим [2]):

- контроль методом акустической эмиссии (АЭ);
- контроль методом магнитной памяти (ММП);
- капиллярный (ПВК) либо магнитопорошковый контроль (МПД) по зонам повышенной активности АЭ и зонам концентрации напряжений (ЗКН), выявленным методами АЭ и ММП;
- ультразвуковая дефектоскопия (УЗК) для контроля внутреннего состояния металла в выявленных зонах.

Основные принципы проведения комплекса работ строились на основе действующих нормативных документов [2, 3], при этом были установлены достаточно жесткие приоритеты в очередности проведения дефектоскопии неразрушающими методами. АЭ контроль – поиск зон возможных дефектов, ПВК / МПД и УЗК – идентификация возможных дефектов. ММП – дополнительный метод контроля.

Суть задачи организации контроля:

- оптимизация объема работ для достоверного определения технического состояния элементов объекта;
- достижение высокой чувствительности контроля с приемлемыми затратами и в ограниченный период времени.

Программа работ по неразрушающему контролю сварных соединений внутренней оболочки была утверждена в

установленном порядке и согласована начальником ОХТН Управления по технологическому и экологическому надзору Ростехнадзора по Кемеровской области. Работы проводились в рамках периодического контроля технического состояния изотермического хранилища жидкого аммиака. В рамках комплексной программы работ по неразрушающему контролю были разработаны и утверждены:

- программа контроля методом АЭ;
- программа контроля методом ММП.

Также до начала работ были изготовлены образцы сварных соединений внутренней оболочки, для настройки дефектоскопа и пьезоэлектрических преобразователей, материалом и исполнением соответствующих:

- стыковым сварным соединениям вертикальной стенки: вертикальным заводским, горизонтальным заводским, вертикальным монтажным;
- уторному шву;
- сварным соединениям элементов днища.

Результаты выполненных работ

Работы по диагностированию и неразрушающему контролю непосредственно на объекте были начаты 24 октября и закончены 17 ноября. Всего в работах приняли участие двадцать один работник ЦДОПО, специалисты по различным видам НК. По

результатам проделанного комплекса работ был оформлен отчет на 284 листах.

Для проведения неразрушающего контроля методом АЭ было выполнено семь нагружений. Нагружения группировались в пять испытаний.

Первые два испытания, по два нагружения каждое, – контроль днища и части вертикальной стенки в юго-восточном секторе проведены в 30 кГц частотном диапазоне с целью получения общей обзорной картины АЭ активности подозрительного по результатам оперативной (функциональной) диагностики сектора конструкции.

Третье и четвертое испытания – контроль локальных мест днища в юго-восточном секторе были выполнены в связи с трудностью локализации при больших расстояниях между преобразователями АЭ (ПАЭ) на 30 кГц диапазоне. Мощные сигналы с большими амплитудами невозможно было спроецировать на сварные швы – они иногда попадали на чистый металл. Сделано было предположение, что эти сигналы интерферировали из-за очень сложных путей распространения, обусловленных большим количеством нахлесточных сварных швов.

Пятое испытание – контроль остальной части днища было проведено по настоянию группы АЭ контроля для исключения пропуска в уторном сварном шве и сварных швах окрайка днища, и выявления дефектов характерных выявленным при контроле юго-восточного сектора, ибо никаким более способом на такой громадной площади в столь ограниченное время их невозможно было обнаружить. Кроме того, необходимо было учесть, что в

случае обнаружения недопустимых дефектов, необходимо еще и значительное время на их устранение. Было вполне обоснованное предположение с точки зрения АЭ контроля, что у границы юго-восточного и юго-западного секторов может существовать сквозной дефект. Следует отметить, что программой работ возможная необходимость такого расширения зоны контроля была предусмотрена.

По результатам АЭ контроля были выделены одиннадцать зон активности акустической эмиссии. Девять зон проецировались в юго-восточный сектор, две на сварные швы днища, семь на уторный шов. Одна зона проецировалась на уторный шов в юго-западный сектор у границы с юго-восточным сектором. Одна зона проецировалась на сварное соединение вварки обечайки люка-лаза в вертикальную стенку (северо-восточный сектор).

На всех участках сварных швов, куда проецировались зоны АЭ, была выполнена идентификация возможных дефектов методами ПВК и УЗК. Дефекты были обнаружены в трех зонах. Они были идентифицированы как дефекты с возможностью развития до сквозного в следующих зонах (используется нумерация заключения по АЭ):

- зона 7 (участок уторного шва длиной 950 мм) – скопление пор на участке длиной 120 мм;
- зона 8 (участок шва приварки днища к окрайку длиной 270 мм) – скопление пор на участке длиной 80 мм;
- зона 11 (участок уторного шва длиной 2250 мм) – множество точечных и протяженных дефектов разной длины, включая

трещину длиной 45 мм, развившуюся и в уторный шов и в лист крайка днища.

ММП было выявлено четыре зоны концентрации напряжений, местоположение которых совпало с зоной 11.

При послойном капиллярном контроле была выполнена выборка дефектов механическим способом. В зонах 7 и 8 дефекты проявились как сквозные. В зоне 11, как сквозной дефект, проявились скопления пор переходящие в трещину. В зонах 7 и 8 была отмечена следующая особенность состояния сварных швов – материал валика шва представлял собой мелкопористую губку (возможно, как результат водородного охрупчивания [5]). Проявилось это следующим образом. После подготовки участков сварных соединений под контроль (обезжиривание, зачистка) ПВК пор не показывал, но стоило валик шва немного нагреть (трением шлифовального круга шлифмашинки) на проявителе появлялись следы выступившего из пор масла. В зоне 11 такой особенности не отмечено, так как выборка дефектного участка проводилась монтажниками при относительно более редком проведении ПВК.

Более детальный анализ проведения работ показывает:

1 Техническое руководство неразрушающим контролем и диагностикой должен осуществлять руководитель группы АЭ-контроля, так как вся информация по диагностике (качественному состоянию элементов конструкции) сосредоточена у него (результаты контроля АЭ и ММП), а остальной неразрушающий контроль проводился после для уточнения количественных показателей обнаруженных при контроле АЭ и ММП дефектов.

2 Для взаимодействия всех подразделений и специалистов (групп АЭ-контроля, контроля ММП, неразрушающего контроля, монтажников, персонала цеха и др.), участвующих в испытаниях и в работах по их обеспечению, должно быть определено и специально уполномочено должностное лицо, имеющее опыт в проведении комплексных диагностических работ (вариант ОАО «Азот» – главный специалист по диагностике либо ведущий инженер по диагностике). Этому специалисту должна оперативно предоставляться объективная (без субъективных искажений) информация, полученная в процессе работ.

3 Работы по диагностированию необходимо проводить в следующем порядке. На первом месте при проведении работ должен выступать контроль ММП, пока металл «чист» и не появились участки с остаточной намагниченностью (особенно это важно в зоне сварных швов) после установки мощных магнитов крепления датчиков АЭ. При проведении контроля ММП после АЭ контроля по выявленным зонам повышенной активности АЭ приходится учитывать влияние наведенных магнитных полей от сильных постоянных магнитов крепления датчиков АЭ, что не всегда возможно с достаточной степенью достоверности. Остальной порядок проведения работ по «Программе» оставить без изменения.

4 Применение датчиков на 30 кГц при контроле днища изнутри можно признать возможным только как обзорное для констатации наличия дефектов без определения точного места их нахождения из-за очень сложной геометрии распространения,

интерференции сигналов и относительно небольшого затухания в этом диапазоне частот. Один из вариантов применения датчиков на 30 кГц при контроле днища, уторного шва и вертикальной стены в пределах первого пояса – размещение их снаружи на анкерных связях крепления внутренней оболочки хранилища к основанию. При этом возможно произвести обзор наличия дефектов в элементах днища, уторном шве и нижнем поясе стенки в условиях непосредственной эксплуатации хранилища при колебаниях уровня заполнения хранилища (кратковременный мониторинг). Возможность применения такого варианта на «сухом» хранилище была проверена по окончании работ.

5 Крайне необходимо использовать не менее чем 60-ти канальную систему для уменьшения количества нагружений и ненужной потери каналов между сопряженными системами АЭ, что в последствии приводит к затруднениям при обработке информации. Использование систем с меньшим количеством каналов (например, 16-ти или 32-х канальных) лишено практического смысла в виду высоких требований к чувствительности контроля в совокупности со значительной площадью контроля. К этому следует добавить, что при большом количестве нагружений безвозвратно теряется очень важная информация о других (неразвивающихся) дефектах, теряется при последующих нагружениях. В идеале весь контроль надо бы проводить по стандартной схеме – за два нагружения.

6 Схему контроля, указанную в инструкции [2], применять также нет смысла, так как она применялась нами еще при 8-ми

канальных системах длительное время при большом количестве нагружений в виду отсутствия мощной многоканальной (не менее 60-ти каналов) системы. Эта схема пригодна для поиска развивающихся достаточно мощных дефектов, найти же течь, составляющую по эквиваленту десятые или сотые доли мм² да еще, возможно, заполненную маслом, и при незначительном избыточном давлении – абсолютно нереально. Это показал опыт проведения контроля вакуумным течеискателем (ВТИ). При явно видимом (обнаруженном при АЭ контроле и подтвержденном ПВК) сквозном дефекте, ВТИ с первого раза течь не была обнаружена, хотя в свищ на значительное расстояние (далеко за пределы предполагаемой границы провара нахлесточного сварного шва) входила тонкая иголка. Течь удалось подтвердить только после прогрева шва трением шлифовального круга, и удалением выступившей части масла в результате этого из свища (компрессорное масло обладает довольно большой вязкостью в диапазоне температур +5 – +20⁰С). Применение схемы контроля, указанной в РД 03-410-01, лишено практического смысла при поисках течей малых сечений в виду того, что эта схема пригодна для поиска уже проявившихся и достаточно мощных развивающихся дефектов. Для эффективного выявления не только всех видов уже имеющихся дефектов, но и зон их возможного образования необходима высокопроизводительная многоканальная АЭ система с набором датчиков в широком диапазоне частот для построения эффективной схемы контроля по типу частотной решетки.

7 АЭ контроль при проведении диагностических работ изотермических резервуаров на базе многоканальных и высокопроизводительных АЭ систем необходимо признать без всяких оговорок **основным** по типу того, как это сделано в части диагностики емкостного оборудования и трубопроводов АХУ. При этом необходимо разрабатывать приемы контроля, позволяющие повышать чувствительность контроля уторного шва.

Заключение

По результатам проделанной работы при неразрушающем контроле внутренней оболочки изотермического резервуара, а также накопленного ранее опыта неразрушающего контроля при техническом диагностировании изотермических резервуаров возможно отметить следующее.

Диагностику технического состояния элементов конструкции изотермических резервуаров необходимо строить по совокупности:

- контроля качественного состояния элементов конструкции – выявление зон не только уже образовавшихся дефектов, но и зон возможного образования дефектов при последующей эксплуатации;
- количественного контроля выявленных дефектных и квазидефектных участков элементов конструкции – идентификации и описания указанных участков элементов конструкции.

Соответственно, контроль качественного состояния конструкции должен выступать на первом месте.

Основными методами контроля качественного состояния должны являться АЭ контроль и контроль ММП, в сочетании, наиболее полно реализующем потенциал этих методов контроля.

Для предварительного этапа контроля качественного состояния элементов конструкции внутренней оболочки изотермических резервуаров (типа вертикальных цилиндрических) допустимо использовать АЭ контроль с размещением датчиков АЭ на анкерных связях крепления внутренней оболочки хранилища к основанию, при наполнении и разгрузке хранилища перед остановкой. В этом случае возможна оценка напряженно-деформированного состояния днища, уторного шва и вертикальной стены в пределах первого пояса в реальных условиях. Этот же подход возможно реализовать и при мониторинге элементов хранилища в процессе эксплуатации.

По всей видимости, необходимо внести дополнения в существующую инструкцию [2]. А так же при проектировании и изготовлении изотермических резервуаров следует закладывать возможность проведения неразрушающего контроля и диагностики с высокой степенью достоверности без вывода объекта из эксплуатации. Для чего следует провести исследования для построения «новых» диагностических схем.

Список литературы

1. «Общие правила промышленной безопасности для организаций, осуществляющих деятельность в области промышленной безопасности

опасных производственных объектов» ПБ 03-517-02, утверждены постановлением Госгортехнадзора РФ от 18.10.02 №61-А.

2. «Инструкция по проведению комплексного технического освидетельствования изотермических резервуаров сжиженных газов» РД 03-410-01, утверждена постановлением Госгортехнадзора РФ от 20.07.01 №32.

3. «Правила устройства и безопасной эксплуатации сосудов, работающих под давлением» ПБ 03-576-03, утверждены постановлением Госгортехнадзора РФ от 11.06.03 №91.

4. «Правила организации и проведения акустико-эмиссионного контроля сосудов, аппаратов, котлов и технологических трубопроводов» РД 03-593-03, утверждены постановлением Госгортехнадзора РФ от 09.06.03 №77.

5. Горицкий В. М. Диагностика металлов. – М.: Металлургиздат, 2004.

О ПРОБЛЕМАХ И ПРОТИВОРЕЧИЯХ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ МЕТОДА АЭ В ТЕХНИЧЕСКОЙ ДИАГНОСТИКЕ

Е.Г. Дорохова, Г.А. Бигус
(ФГУ НУЦ «Сварка и контроль»
при МГТУ им. Н.Э.Баумана, г. Москва)

В нашей стране значительная часть промышленных конструкций и сооружений была построена в 60-е – 70-е годы прошлого века, и сейчас, не только назначенный срок их службы, но и их физический ресурс практически исчерпан.

Это значит, что очень велика вероятность возникновения и развития в материале конструкций дефектов, которые могут привести к разрушению и последующей катастрофе. Цена отказа оборудования на опасном производстве, особенно в густонаселенных районах, слишком велика, чтобы пренебрегать возможностью его предупредить. При сокращении периодов между диагностическими мероприятиями в определенный момент может возникнуть противоречие между финансовыми издержками предприятия на периодическое диагностирование и увеличением риска возникновения критических дефектов в промежутках времени между проверками.

Как ни странно, в этой ситуации более экономически выгодным для своевременного обнаружения областей и элементов конструкции, находящихся в состоянии предразрушения, является практически

непрерывное наблюдение за изменениями, происходящими в материале объекта повышенного экологического риска, а именно, использование систем комплексного мониторинга технического состояния объекта при системном использовании ряда методов неразрушающего контроля (НК), преимущественно акустических (УЗК, вибродиагностика, акустико-эмиссионный метод с элементами тензометрии и т.п.), когда наблюдению подлежат и параметры технологического процесса, и напряженно-деформированное состояние конструктивных элементов, и эволюция свойств материала объекта и его дефектов.

Из перечисленных методов НК наиболее подходящим на роль базового можно считать акустико-эмиссионный, как наиболее эффективный при контроле динамических изменений структуры материала и дополняемый вибрационными, ультразвуковыми измерениями, а также измерениями технологических параметров. Но эти решения не лишены противоречий, причем главной проблемой, в данном случае, является отсутствие адаптации методов НК к непрерывному наблюдению в пассивном режиме и методик их совместного использования и разработка средств автоматизированного принятия решения. В связи с этим, очевидна необходимость разработки комплексного метода и технологии непрерывного наблюдения за состоянием опасного объекта на основе акустических методов НК и нормативной базы к нему.

Вторая проблема заключается в парадоксальной ситуации, когда техническое и аппаратное обеспечение диагностического процесса в своем развитии обогнало его теоретическую и методическую базу.

Несовершенство теоретической базы и используемых математических моделей сказывается и на состоянии системы критериев, развитие которой находится на уровне сорокалетней давности, и связано с не проведением лабораторных и натуральных экспериментов в необходимом количестве и качестве с конструктивным осмыслением как положительных, так и отрицательных результатов.

До сих пор отсутствие какой бы то ни было вразумительной и общепонятной привязки АЭ данных, получаемых на современной высокоразвитой компьютеризированной технике с использованием модных технологий обработки сигнала к реальным процессам, происходящим в материале конструкции в процессе эксплуатации, приводит к плохо скрываемому раздражению как чиновников от неразрушающего контроля и руководителей на предприятиях, так и самих ученых, занимающихся исследованием акустической эмиссии.

ПРОБЛЕМЫ ОЦЕНКИ ОСТАТОЧНОГО РЕСУРСА ОБОРУДОВАНИЯ И ПУТИ ИХ РЕШЕНИЯ НА ОСНОВЕ ЭКСПРЕСС- МЕТОДОВ НК

А.А. Дубов, Ал.А. Дубов

(ООО «Энергодиагностика», г. Москва)

Среди основных научно-технических проблем оценки ресурса оборудования следует выделить следующие:

- отсутствие научно-обоснованной концепции технической диагностики и определения ресурса;
- недостаточная эффективность традиционных методов и средств неразрушающего контроля (НК) при ранней диагностике усталостных повреждений и исследовании структурно-механических свойств металла;
- низкая эффективность существующих методик поверочного расчета на прочность из-за отсутствия фактических структурно-механических свойств металла по всем элементам и узлам оборудования;
- отсутствие в широкой практике эффективных средств и методов НК, позволяющих выполнить 100% обследование оборудования с целью оценки напряженно-деформированного состояния и индивидуального ресурса каждого узла и агрегата в целом.

Выполнение 100% обследования оборудования с использованием традиционных методов НК (УЗД, МПД, и др.) связано не только с высоким уровнем затрат, но является малоэффективным из-за их непригодности к выявлению усталостных повреждений на раннем этапе их развития.

Основным параметром, характеризующим состояние металла оборудования, работающего в условиях циклических нагрузок, как правило, предлагается считать трещиностойкость. Необходимо помнить, что это условная характеристика материала, которая определяется отношением текущей (фактической в данное время, в данных условиях) скорости роста трещины к критической скорости для данного материала. Однако определяется эта характеристика на образцах, и перенос результатов лабораторных испытаний на реальные условия эксплуатации не дает объективной оценки работоспособности оборудования.

Можно ли сделать оценку скорости роста трещин и выявить зоны их развития в реальных условиях непосредственно на оборудовании?

Известно, что основная цель 100% обследования – выявить потенциально опасные зоны концентрации напряжений (ЗКН), в которых происходит развитие повреждений из-за коррозии, усталости и ползучести. Именно для решения этой задачи предлагается использовать метод магнитной памяти металла (МПМ), основное назначение которого – выявление ЗКН на основе экспресс-контроля всей поверхности оборудования. При этом никаких подготовительных работ не требуется.

ЗКН – это не только заранее известные области, где особенности конструкции создают различные условия для распределения напряжений, создаваемых внешней рабочей нагрузкой, но и случайно расположенные области, где в силу начальной неоднородности металла в сочетании с нерасчетными дополнительными рабочими нагрузками возникли большие деформации (как правило, деформации сдвига).

В работе [1] рассмотрена физическая сущность усталостной поврежденности металла и предложена модель развития этого процесса, открывающего возможность количественной оценки состояния материала при использовании метода магнитной памяти металла.

Основным диагностическим параметром по методу МПМ является градиент магнитного поля рассеяния H_p (dH_p/dx) или коэффициент интенсивности изменения этого поля ($K_{ин}$), фиксируемого при сканировании датчиком специализированного магнитометра вдоль поверхности оборудования. Установлено, что именно этот диагностический параметр в силу магнитомеханического эффекта напрямую отображает энергетическое состояние поверхностных и глубинных слоев металла в ЗКН. При этом, максимальное значение градиента поля, определяемое на поверхности металла с точностью до миллиметра, соответствует источнику возникновения трещины. В области наиболее интенсивного процесса деформирования и, в конечном итоге, разрушения доменная структура претерпевает значительные изменения. Размеры доменов, направления которых совпадают с

направлением скольжения, достигают критических размеров. В итоге домен с максимальным размером «раскалывается» – образуется микротрещина. Именно это состояние металла в ЗКН предлагается считать предельным при контроле оборудования методом МПМ.

В лабораторных исследованиях на образцах при статических и циклических нагрузках было получено энергетическое соотношение между магнитными и механическими параметрами:

$$m = \frac{K_{ин}^{пр}}{K_{ин}^{ср}} = \left(\frac{\sigma_{в}}{\sigma_{т}} \right)^2, \quad (1)$$

где $K_{ин}^{ср}$ и $K_{ин}^{пр}$ – значения градиента магнитного поля, фиксируемые в ЗКН на образце, или непосредственно на оборудовании, соответственно при достижении условного предела текучести $\sigma_{т}$ и условного предела прочности $\sigma_{в}$.

На рис.1 представлен график изменения градиента поля $K_{ин}$ в зависимости от числа циклов нагрузки при испытании трубного образца $\varnothing 108 \times 4$ мм (сталь 20) на растяжение с максимальной амплитудой напряжений 276 МПа и частотой 10 Гц. Полученный график характеризует четыре фазы усталостного разрушения металла образца в ЗКН, образовавшейся в первые 1000 циклов приложения нагрузки:

I фаза – подготовительная, заключающаяся в перераспределении продольных неоднородностей деформации, выстраивающихся в создавшихся условиях в «удобную» для металла последовательность. Процесс в этой фазе характеризуется

сравнительно высокой скоростью и продолжается сравнительно недолго - $1 \div 1,5\%$ от предельного количества циклов;

II фаза – основная накопительная, характеризуется медленным развитием процесса и продолжается сравнительно долго;

III фаза – наблюдается интенсивное развитие пластической деформации, приводящее к возникновению в ЗКН микротрещин (стадия упрочнения перед разрушением);

IV фаза – период развития микротрещины в макротрещину, вплоть до разрушения образца.

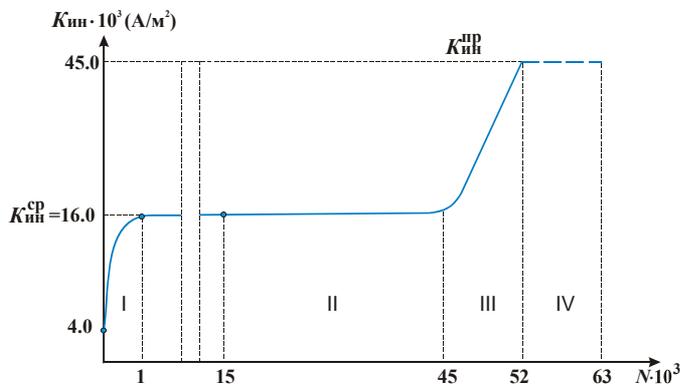


Рис.1. Изменение градиента поля в ЗКН образца № 6 в зависимости от числа циклов нагрузки растяжения.

Представленные результаты экспериментальных исследований на трубчатом образце свидетельствуют о возможности использования метода магнитной памяти металла при оценке ресурса реального оборудования.

Соотношение (1) неоднократно подтверждалось непосредственно на оборудовании при обследовании методом

МПМ. В соответствии с результатами расчетных исследований, представленных в работе [1], магнитный параметр $K_{ин}$ характеризует плотность магнитной энергии w_m , обусловленной механической энергией деформации от силового воздействия w_c :

$$K_{ин} \sim \frac{w_m}{w_c} \sim \frac{2E}{\sigma^2}, \quad (2)$$

где E – модуль упругости (или модуль пластичности для пластической деформации).

Из соотношения (2) следует: чем больше силовая энергия w_c расходуется на деформацию (при этом уменьшаясь!), тем больше выделяется магнитной энергии w_m , которая дает увеличение измеряемого магнитного параметра $K_{ин}$.

Сравнивая состояние образца при экспериментальных исследованиях по магнитному параметру $K_{ин}$ при достижении им предела текучести σ_T по отношению к состоянию этого же образца при достижении предела прочности σ_B , получаем:

$$\frac{K_{ин}^B}{K_{ин}^T} \approx \frac{\sigma_B^2 \cdot 2E}{2E \cdot \sigma_T^2} \approx \left(\frac{\sigma_B}{\sigma_T} \right)^2. \quad (3)$$

Энергетическое соотношение (3), полученное в расчетных исследованиях, подтверждает соотношение (1), полученное в экспериментальных исследованиях. Более подробно на физическом уровне соотношение (3) рассмотрено в работе [3].

Используя полученные соотношения (1) и (3) между магнитными и механическими показателями деформационного упрочнения, предлагается на практике выполнять оценку ресурса

оборудования в ЗКН на основании измеренных показателей $K_{ин}^{cp}$ и фактической наработки данного узла на дату контроля T_{ϕ} .

Если известны среднее значение $K_{ин}^{cp}$, соответствующее уровню пластической деформации в ЗКН для однотипных узлов оборудования (определяется по результатам измерений на практике), фактическое максимальное значение $K_{ин}^{\phi}$, измеренное в ЗКН данного узла, и фактическая наработка данного узла T_{ϕ} на дату контроля, то можно рассчитать предельное время эксплуатации $T_{пр}$ этого узла следующим образом:

$$T_{пр} = \frac{K_{ин}^{np}}{K_{ин}^{\phi}} \cdot T_{\phi}, \quad (4)$$

где $K_{ин}^{np}$ известно из лабораторных или промышленных исследований, а если не известно, то $K_{ин}^{np}$ определяется из соотношения (1) на основе измеренного значения $K_{ин}^{cp}$ и известных механических характеристик $\sigma_{т}$ и $\sigma_{в}$.

Таким образом, остаточный ресурс контролируемого узла с ЗКН составит:

$$T_{рес} = T_{пр} - T_{\phi}. \quad (5)$$

Предлагаемый способ определения предельного состояния металла в ЗКН и оценки ресурса оборудования основан на принятом допущении линейной зависимости во времени процесса накопления пластической деформации и усталости металла. На момент контроля магнитный параметр $K_{ин}^{\phi}$ характеризует фактическое энергетическое состояние металла в ЗКН. При этом не

важно, каким образом (по какой зависимости от параметров нагрузки) было достигнуто данное энергетическое состояние. Металл в ЗКН с течением времени как бы дискретно переходит из одного энергетического состояния в другое. Если нам удастся зафиксировать значения $K_{ин}^{\phi}$ в разные периоды времени (T), то мы получим линейную зависимость $K_{ин}=f(T)$ по фиксированным моментам (точкам) различного энергетического состояния металла в ЗКН. Учитывая, что магнитный параметр $K_{ин}$ отображает изменение остаточной деформации в ЗКН, то соответственно в этой зоне справедлив линейный закон суммирования (накопления) пластической деформации (упрочнения).

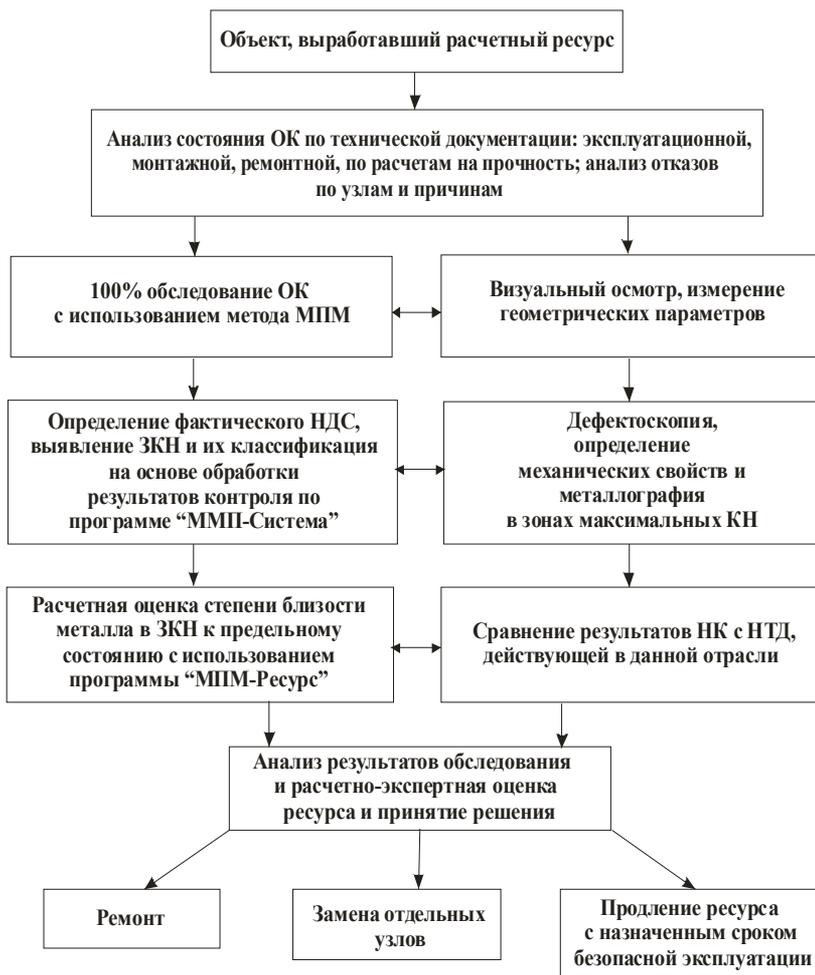


Рис.2. Структурная схема определения остаточного ресурса оборудования с использованием метода МПМ.

В настоящее время ООО «Энергодиагностика» в результате большого опыта обследования трубопроводов и различного оборудования располагает количественными значениями $K_{ин}$, характеризующими предельное состояние металла по условиям прочности и начальное развитие микро- и макротрещин.

Разработаны методические указания по оценке ресурса оборудования на основе измеренных параметров магнитной памяти металла. В работе [4] рассмотрены примеры оценки ресурса. Обработка результатов контроля оборудования методом МПМ осуществляется по программе «ММП-Система». Расчетная оценка степени близости металла в ЗКН к предельному состоянию и расчет остаточного ресурса выполняется по программе «ММП-Ресурс».

На рис.2 представлена структурная схема определения остаточного ресурса оборудования с использованием метода МПМ. Принципиальным отличием такого подхода к оценке ресурса является выполнение 100% обследования ОК с выявлением всех потенциально опасных ЗКН – источников возникновения повреждений при дальнейшей эксплуатации оборудования.

В 2005 году специалистами ООО «Энергодиагностика» подготовлен проект стандарта «Методические указания по оценке ресурса потенциально-опасных объектов на основе экспресс-методов технической диагностики».

К экспресс-методам отнесены пассивные методы НК, использующие внутреннюю энергию металла конструкций:

- метод акустической эмиссии (АЭ);
- метод магнитной памяти металла (МПМ);
- тепловой контроль.

Эти методы получили в настоящее время наибольшее распространение на практике для ранней диагностики повреждений оборудования и конструкций.

Следует отметить, что развитие идеологии метода АЭ и теплового метода с использованием энергетического соотношения (3), полученного в методе МПМ, даст возможность качественно изменить статус этих давно известных методов, переводя их из методов дефектоскопии в методы энергодиагностические.

Важным отличием предлагаемых МУ по сравнению с РД 09-102-95 который был разработан ранее, является следующее:

- более конкретно определены роль и задачи современных методов технической диагностики – 100% обследование и выявление зон концентрации напряжений (ЗКН), определяющих надёжность и остаточный ресурс оборудования и конструкций. Эти задачи обозначены в новом национальном стандарте России ГОСТ Р 52330-2005г. [5];

- в качестве основных критериев предельного состояния металла предлагается использовать фактические энергетические характеристики, которые можно определить методами МПМ, АЭ и теплового метода;

- учтены новые требования Ростехнадзора РФ к экспертному обследованию оборудования и Федерального закона «О техническом регулировании»;

- скорректирована структурная схема определения остаточного ресурса с акцентом на современные экспресс-методы технической диагностики;

- поверочные расчёты на прочность с оценкой остаточного ресурса предлагается выполнять для ЗКН, остающихся в

эксплуатации, с учётом фактических структурно-механических свойств металла, выявленных при обследовании.

При реализации предлагаемых МУ представляется возможным в большинстве случаев без выполнения сложных поверочных расчётов на прочность делать экспертную оценку ресурса на основе комплексного обследования оборудования (см. рис.2) и назначать срок безопасной эксплуатации.

На основе предлагаемых МУ для конкретного оборудования возможна разработка более конкретной методики оценки ресурса с учётом специфически особенностей и требований, существующих в данной отрасли промышленности.

Список литературы

1. Власов В.Т., Дубов А.А. Физические основы метода магнитной памяти металла. М.: ЗАО «ТИССО», 2004. 424 с.
2. Дубов А.А. Оценка ресурса энергооборудования с использованием метода магнитной памяти металла // Энергетик. 2006. №11.
3. Власов В.Т., Дубов А.А. Физическая теория процесса «деформация-разрушение». М.: ЗАО «ТИССО», 2007. 517 с.
4. Дубов А.А., Дубов Ал.Ан., Колокольников С.М. Метод магнитной памяти металла и приборы контроля. Учебное пособие. М.: ЗАО «ТИССО», 2006. 332 с.
5. ГОСТ Р 52330-2005г. Контроль неразрушающий. Контроль напряженно-деформированного состояния объектов промышленности и транспорта. Общие требования.

НОВИНКИ ПРОГРАММНОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ АЭ СИСТЕМ СЕМЕЙСТВА A-LINE

*С.В. Елизаров, А.В. Букатин,
М.Ю. Ростовцев, Д. Терентьев
(ООО «ИНТЕРЮНИС», г. Москва)*

Универсальное программное обеспечение A-Line, являющееся неотъемлемой частью АЭ систем одноименной серии производства ООО «ИНТЕРЮНИС», предназначено для решения широкого круга задач по обработке и визуализации данных и полнофункционального управления аппаратной частью комплекса. Параллельно с разработкой новых поколений АЭ систем семейства A-Line совершенствовалось и его программное обеспечение, выполненное на базе современных достижений в области информационных технологий и методов программирования с учетом богатого опыта реального применения АЭ, накопленного специалистами компании и многочисленными пользователями комплексов серии A-Line.

В представленной работе кратко описаны важные функциональные особенности указанного ПО из числа реализованных за последнее время, а именно: новый метод нечеткой локации источников АЭ сенсорной антенной произвольной формы на поверхностях тонкостенных сосудов, информационный статистический критерий для разделения АЭ источников по типу и метод оценки расстояния от датчика до

предполагаемого источника на основе вэйвлет-анализа АЭ импульса с учетом частотных зависимостей групповых скоростей волн Лэмба.

Нечеткая локация антенной произвольной формы (НЛАП)

Одним из главных недостатков классических методов локации АЭ источников при диагностике тонкостенных сосудов является их чувствительность к искажениям фронта импульса, образованного несколькими волнами Лэмба, обладающими дисперсией скорости распространения. За счёт этих факторов координаты источника вычисляются с ошибкой, величина которой трудноопределима. Ценность нового метода состоит в повышении уровня достоверности и точности определения местонахождения источников сигналов АЭ за счёт учёта влияния различных факторов на величину скорости распространения акустического сигнала и искажения фронта акустических импульсов.

Суть предлагаемого метода состоит в том, чтобы задавать не одну скорость распространения, а диапазон (или несколько диапазонов) скоростей, содержащий скорости основных мод упругих волн на конструкции. Этот диапазон скоростей можно дополнительно расширить для учёта искажения фронта волн за счёт конструкционных особенностей контролируемого объекта (например, люков, патрубков, сварных швов и т. п.) и анизотропных свойств материала конструкции. Затем вычисление местонахождения источника АЭ производится исходя из того, что

скорость волны, время прихода фронта которой зарегистрировано каждым из датчиков, находится в выбранном диапазоне скоростей.

При описании данного метода локации удобно оперировать понятием «пачки» импульсов: некоторой совокупности сигналов АЭ, зарегистрированных различными преобразователями, установленными на объекте контроля. Важнейшей характеристикой пачки является ее длительность, то есть временной интервал между хронологически первым и последним импульсом в ее составе. Если длительность пачки заведомо меньше некоторого характеристического значения, зависящего от геометрических параметров объекта и оценочной скорости распространения упругих волн в материале объекта, то можно предположить, что вся совокупность импульсов была испущена одним источником за один акт излучения. Метод НЛАП состоит в том, чтобы для каждой такой пачки импульсов вычислить на объекте область, состоящую из всех возможных точек, где могло произойти такое событие, которое могло создать данную пачку импульсов при данной расстановке датчиков и данном диапазоне скоростей распространения упругих волн по поверхности объекта. Для этого поверхность объекта моделируется дискретной сетью из конечного числа точек, и для каждой пачки импульсов вычисляются все узлы этой сети, в окрестности которых теоретически могло произойти событие, создающее данную пачку. Перечень всех таких узлов и является описанием области локации для данной пачки.

Локация является нечёткой, поскольку для каждой пачки указывается не одна точка на объекте, а область. Однако

единственную точку локации невозможно вычислить без ошибки, поэтому данный нечёткий метод является более точным, чем точечная локация, поскольку в выдаваемой области искомый источник события находится с большой вероятностью. Пересечение областей локации, полученных для разных пачек, даёт возможность более точно определить местонахождение источника, при условии, что от одного источника было получено несколько пачек сигналов в результате нескольких дискретных актов излучения. При изображении областей на объекте в программе A-Line участки перекрытия локационных областей раскрашиваются в разные цвета, в зависимости от того, сколько областей перекрываются на данном участке.

Размер найденной области может быть уменьшен, и, следовательно, точность определения местонахождения источника может быть дополнительно повышена несколькими способами:

1. обоснованным сужением выбранного диапазона скоростей упругих волн, например, за счёт более точного измерения скоростей используемых мод волн и исключения некоторых мод из рассмотрения ввиду исключения возможности регистрации их прихода на датчики;

2. исследованием пересечения областей, вычисленных для разных импульсов. Если области достаточно сильно пересекаются, то есть площадь пересечения областей больше определённого процента площади их объединения, то соответствующие импульсы могут быть предположительно отнесены к одному источнику, а областью местонахождения этого источника может быть принято

пересечение областей, найденных для относящихся к нему импульсов;

3. выбором оптимального числа датчиков для расчёта каждой из областей местонахождения источников, то есть использование данных от оптимального числа датчиков;

4. для некоторых датчиков диапазоны скоростей акустических волн могут задаваться индивидуально, с учётом того, что на тот или иной преобразователь могут приходиться или, напротив, не могут приходиться определённые моды волн.

Все вышеперечисленные параметры метода могут быть оперативно изменены оператором с целью достижения наилучших результатов работы. На рис. 1 приведены результаты применения НЛАП в сравнении с классическим триангуляционным методом локации на поверхности сферического резервуара.

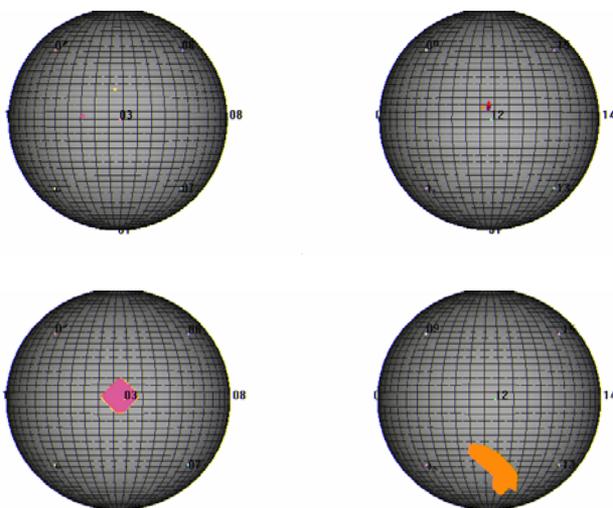


Рис. 1. Результаты применения НЛАП в сравнении с классическим триангуляционным методом локации на поверхности сферического резервуара

В заключение приведем основные преимущества НЛАП перед классическими точечными способами локации:

- метод не накладывает ограничений на геометрический порядок и расстановку датчиков на объекте контроля;
- задаётся диапазон скоростей распространения упругих волн по поверхности контролируемого объекта, что более реалистично, чем задание ее константой или подбор скалярного значения;
- локация производится по произвольному числу любых импульсов в пачке (от двух и более), максимальное число импульсов, используемых для локации, задается как параметр алгоритма;
- локация производится с учётом реальной геометрической формы объекта, что сводит искажения и связанные с ними ошибки к минимуму; что требует, однако, более точного описания геометрической формы объекта и задания всех соответствующих параметров;
- результат локации по одной пачке сигналов – область на объекте, в которой источник находится с большой вероятностью;
- результат локации по множеству пачек сигналов – набор областей на объекте, пересечение которых друг с другом позволяет легко обнаружить сравнительно небольшие участки, в

которых источник находится с еще более высокой вероятностью.

На метод НЛАП авторами получен патент РФ.

Информационный статистический АЭ-критерий

В силу ряда характерных отличительных особенностей АЭ как вероятностного и необратимого процесса наиболее приемлемыми оказываются статистические методы обработки АЭ информации, которые позволяют выявить наиболее типичные закономерности в развитии процесса, с одной стороны, и усреднить влияние статистических выбросов, с другой. Эффективность идентификации явлений, протекающих в зоне контроля, по данным акустико-эмиссионного контроля существенно повышается, если анализировать поведение во времени не одного признака, а двух или трех в комплексе.

Исходя из классического порогового принципа регистрации, АЭ данные представляют собой не непрерывный сигнал, а последовательность значений параметров импульса (амплитуда A , энергия E , длительность Dur и др.), получаемую непосредственно в ходе эксперимента или испытаний, которая содержит в себе информацию о процессе или совокупности процессов, порождающих АЭ. Эти соображения позволяют предложить критерий разделения этих процессов, а именно, значительное относительное изменение статистических характеристик распределения параметров импульса. Другими словами, момент перехода от одной стадии развития поврежденности зоны контроля

к другой может быть определен моментом нарушения характера потока АЭ данных.

Для того чтобы обеспечить доступ к информации о совокупности процессов, происходящих в диагностируемом объекте вся последовательность АЭ-импульсов, приходящих поканально, дробится на выборки. В данной работе было использовано формирование выборки с фиксированным числом импульсов n . Пока спорным остается вопрос об объеме выборки, так как от этого зависит состоятельность статистических оценок. В данном случае предлагается его решить следующим образом: $n = \sqrt{N_{\Sigma} / n_{pr}}$, где N_{Σ} - суммарное число импульсов в записи, а n_{pr} - число предполагаемых процессов, протекающих в зоне контроля и требующих распознавания. По накопленной выборке строятся гистограммы для каждого из параметров.

Важнейшей характеристикой полученной гистограммы является ее форма. Так, на стадии рассеянного накопления микроповреждений поток АЭ-импульсов обычно считается Пуассоновским, а рост магистральной трещины сопровождается отклонением от этого распределения [1]. Еще один анализ формы амплитудного распределения лег в основу широко ныне известного «*Ib-value*» критерия [2].

В последнее время в работах Научно-учебного Центра «Сварка и контроль» и ООО «Интерюнис» применяется еще одна оценочная характеристика - энтропия распределения S^H [3], которая позволяет оценить степень разупорядоченности в рассматриваемой гистограмме. Анализ данных, полученных как во время модельных

экспериментов, так и во время промышленных испытаний, показал, что в качестве примера идентификационного параметра может быть выбрана следующая зависимость: $F_P = P_{mod}(S^*_P)$. Данная функция F_P представляет собой зависимость моды гистограммы распределения выбранного параметра P_{mod} от относительной энтропии этого распределения S^*_P . Мода представляет собой наиболее часто встречающееся значение амплитуды в выборке. Результаты вычислений по различным каналам регистрации разными цветами наносятся на график в указанных координатах, в результате чего образуется диагностическая диаграмма. Идентификация источника может проводиться по положению групп точек на поле диаграммы. На рис. 2 приведено диалоговое окно настройки диагностической диаграммы.

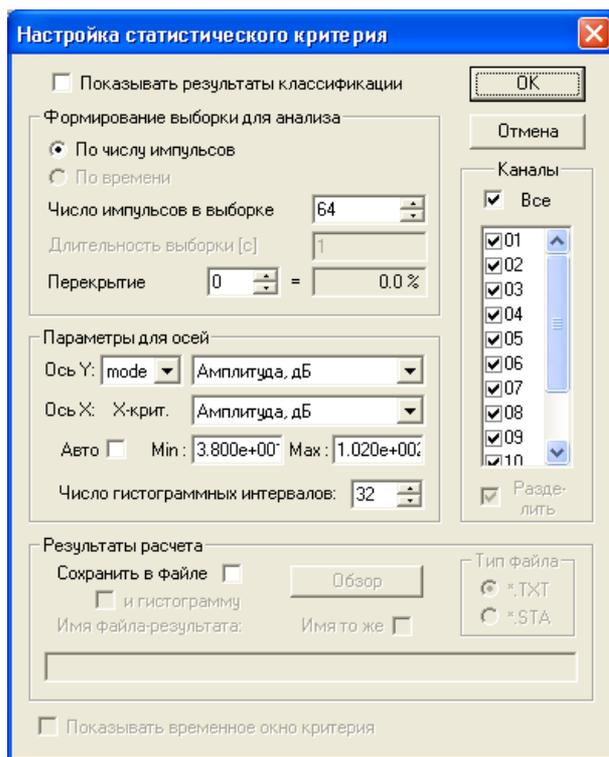


Рис. 2. Диалоговое окно настройки диагностической диаграммы статистического критерия

Ниже приводятся несколько примеров диагностических диаграмм построенных для распределения амплитуд АЭ импульсов. Проследим возможное положение точки на плоскости в координатах « $S_A^H - A_{mod}$ » для возможных процессов на рис. 3-7. На рис.3 показана диагностическая диаграмма нагружения бездефектного объекта. Регист-рируемые АЭ-импульсы на диаграмме локализируются в зоне I. Эта зона характеризуется разбросом энтропии S_A^H в диапазоне (0.3...0.7), а модовое (преобладающее) значение амплитуды лежит выше порогового значения на величину 0-5 дБ. Фактически АЭ-импульсы,

сформировавшие эти статистические точки, являются шумами объекта при опрес-совке (практически Пуассоновский процесс), подчиняющиеся экспоненциальному распределению. Локация таких импульсов обычно представляет собой хаотично разбросанные по поверхности объекта локационные точки.

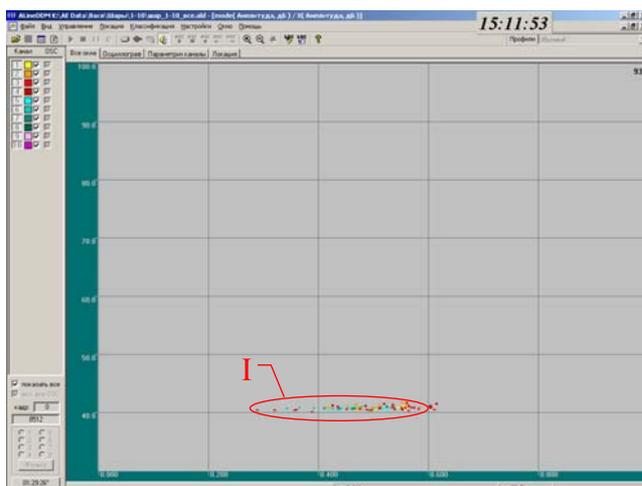


Рис. 3. Диагностическая диаграмма нагружения бездефектного объекта

На рис. 4 показана диагностическая диаграмма нагружения объекта, на котором обнаружен активный АЭ источник. Регистрируемые АЭ-импульсы при нагружении объекта на диаграмме локализуются в зонах I, II и III. Шумовая зона I является своеобразным репером, на фоне которого выделяются другие зоны.

Зона II выделяется на фоне зоны I как модовой величиной амплитуды, так и энтропией, занимая интервал от 0.4 (см. также рис. 5) до 0.8. Эти статистические точки получаются за счет того, что в шумовом потоке начинают преобладать те импульсы,

амплитуда которых выше пороговой. Именно за счет этого модовое значение амплитуды увеличивается. Таким образом, модовое положение точек соответствует степени активности источника, и при малой активности мода вновь будет опускаться на пороговое шумовое значение. Кроме того, значительное повышение преобладающих регистрируемых амплитуд приводит к тому, что модовое значение может подняться до значений свыше 90 дБ (рис. 6 и рис. 7). Энтропия же увеличивается за счет того, что шире становится разброс величин амплитуд, соответственно, увеличивается и степень хаоса.

Зона III соответствует сигналам АЭ, характерным для течей. Эта зона характеризуется разбросом энтропии S_A^H в диапазоне (0.0...0.3), модовое значение амплитуды равно или выше порогового значения. Так, при повышении давления в объекте, содержащем несплошности, течевого сигнал по своей амплитуде практически синхронно так же увеличивается. И при достижении течевого сигнала по амплитуде порогового значения на диагностической диаграмме происходит высыпание статистических точек в III зоне с модовой амплитудой равной пороговой. Дальнейшее увеличение амплитуды течевого сигнала приводит к подъему по диаграмме вверх точек высыпания до соответствующего модового значения.

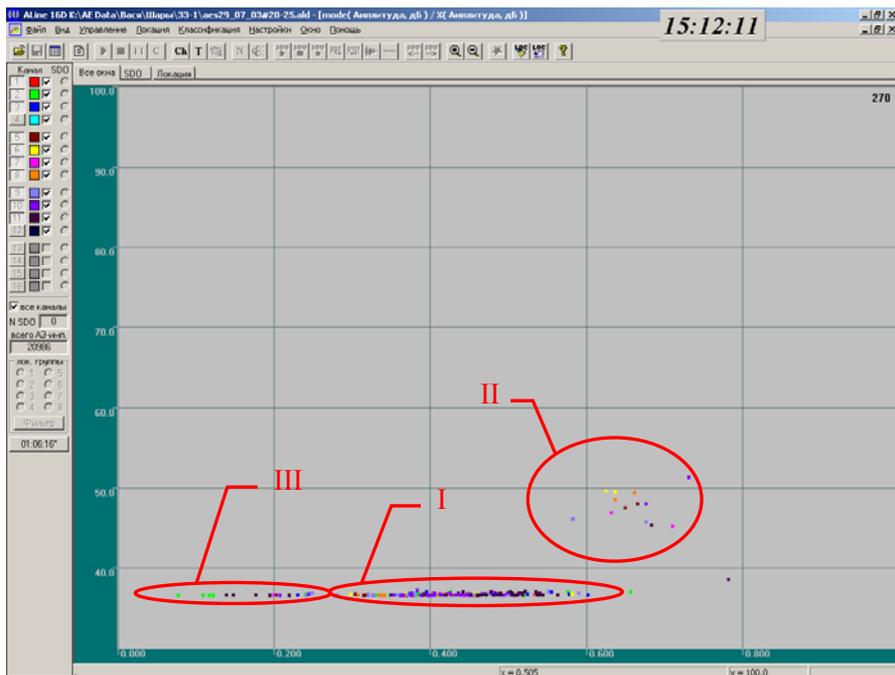


Рис. 4. Диагностическая диаграмма нагружения объекта с активным АЭ источником

На рис. 5 представлена диагностическая диаграмма нагружения ж/д цистерны воздухом. Порог плавающий. Было найдено отверстие порядка $\square 1$ мм. Поскольку уровень порога для каждого канала выставлялся в зависимости от среднего уровня шума, то и локализация на диаграмме имеет ступенчатый характер. Однако, значение энтропии лежит в пределах (0.0...0.3), как и на диаграмме на рис. 4. Разный средний уровень сигнала для каналов связан, по всей видимости, с затуханием: чем дальше от отверстия, тем ниже эта величина.

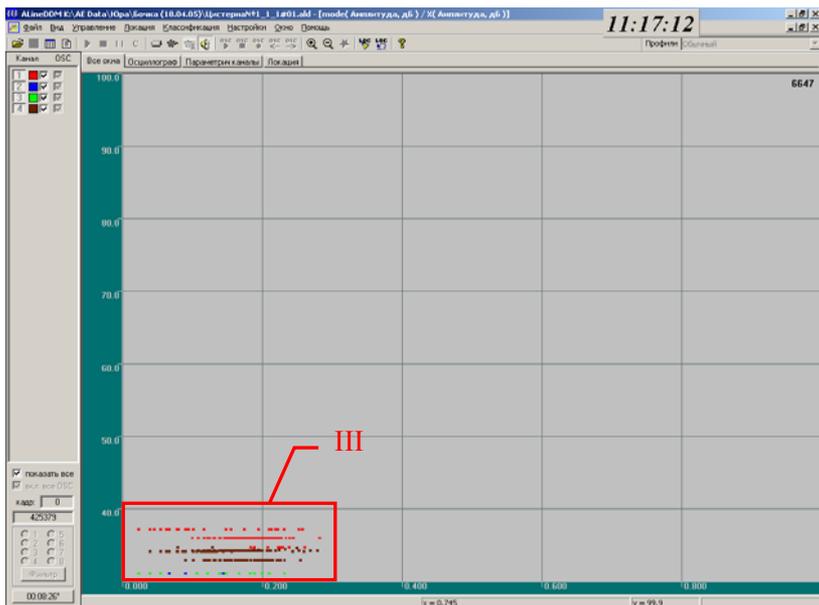


Рис. 5. Диагностическая диаграмма течевого процесс

На рис. 6. представлена диагностическая диаграмма циклического нагружения стандартного образца и доведение его до разрушения. Появление на этой диаграмме зоны III могло быть объяснено течевым процессом, однако, никакого проникновения рабочей среды через несплошность не было по определению. Возможным объяснением этого феномена может быть явление пластической деформации, сопровождающееся АЭ-импульсами с малой (околопороговой) амплитудой. В итоге фоновый шумовой процесс с экспоненциальным распределением буквально растворяется в распределении с единственно возможным околопороговым состоянием от пластической деформации.

Зона II начинает обозначаться в эксперименте при росте «усиков», V-образных трещин в узком сечении образца. Зона IV –

последняя зона, вырисовывающаяся на диагностической диаграмме, соответствует критическому росту трещины (магистральной трещины) перед самым разрушением образца.

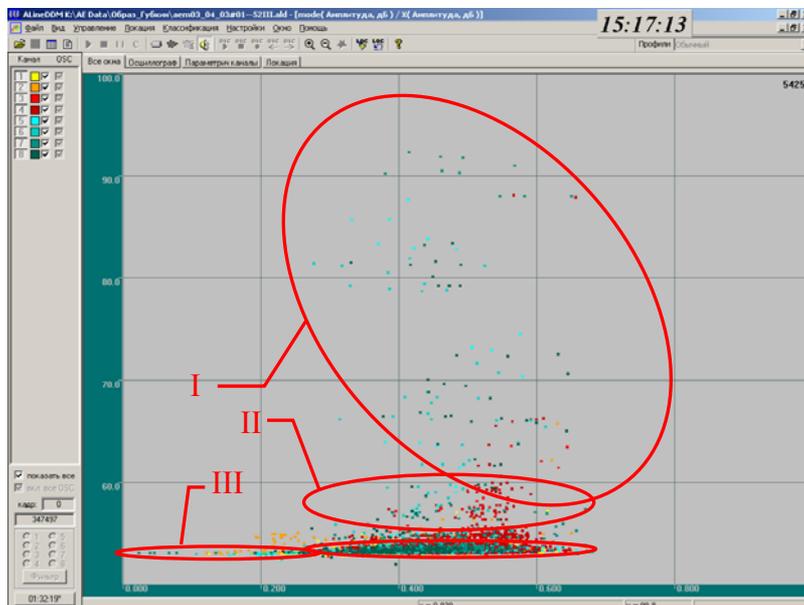


Рис. 6. Диагностическая диаграмма циклического нагружения стандартного образца и доведение его до разрушения

На рис. 7 приведена диагностическая диаграмма процесса нагружения бетонной плиты до разрушения размером 4200X1700X160 мм. При испытании точки ложились в две зоны – I и II, а на заключительной стадии, предшествующей разрушению плиты, обозначилась зона IV. При сравнении рис. 6 и рис. 7 прослеживается прямая аналогия, за исключением зоны III. В итоге можно констатировать, что при разрушении рассматриваемых объектов (ж/б плиты при повторной статике и металлического образца при циклическом нагружении) статистическая диаграмма имеет сходный вид, и получаемые точки на этой диаграмме

поочередно заполняют зоны I, II и IV, причем перед разрушением объекта появляется зона IV – зона от образования магистральных трещин.

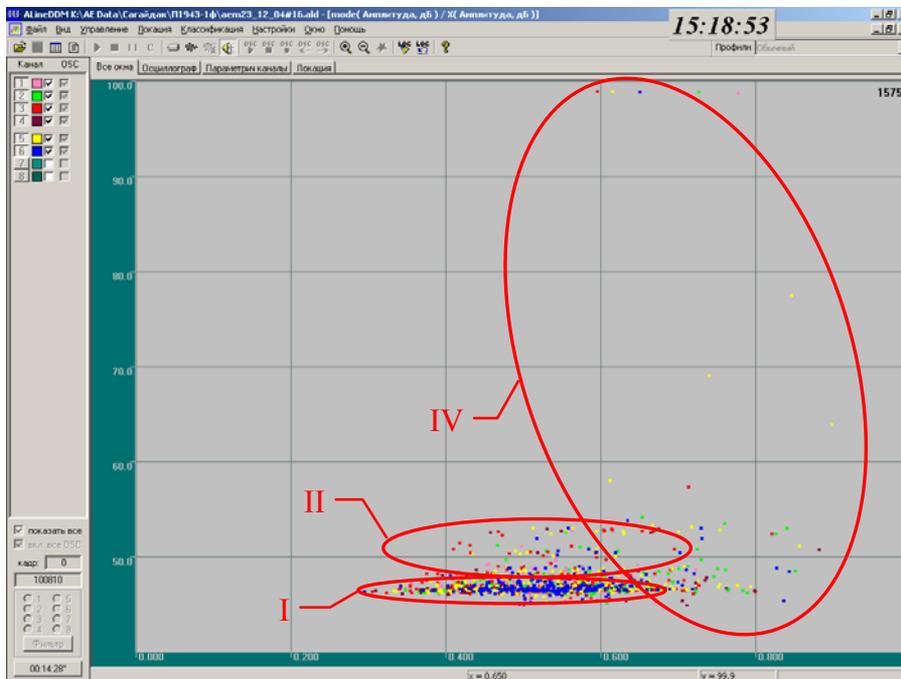


Рис. 7. Диагностическая диаграмма процесса нагружения бетонной плиты до разрушения

Отметим, в заключение, что во всех представленных случаях идентификации типов дефектов (накопление рассеянных микрповреждений, рост магистральных трещин, течь) по совокупности признаков (мода амплитуды сигнала АЭ; энтропия распределения вероятности амплитуд) не проводилось никакой предварительной фильтрации данных.

Некоторые аспекты вейвлет-анализа ПО A-Line OSC Processing

В этой части работы описан вариант применения непрерывного вейвлет-преобразования для оценки расстояния до источника акустико-эмиссионных сигналов, реализованный в специализированной программе для обработки волновых форм.

Вызванное дисперсией групповой скорости размазывание акустико-эмиссионного сигнала во времени, заметно ухудшающее точность определения времени прихода и, как следствие, координат источников АЭ, привело к созданию разнообразных способов дополнительной обработки осциллограмм сигнала. Одним из методов такого анализа является использование частотно-временных преобразований сигнала, наиболее известными и удобными из которых являются вейвлет-спектрограммы, достаточно давно применяемые в АЭ [4]. На рис. 8 приведена экранная форма ПО A-Line OSC Processing, содержащая примеры такого преобразования, выполненные для реальных импульсов АЭ.

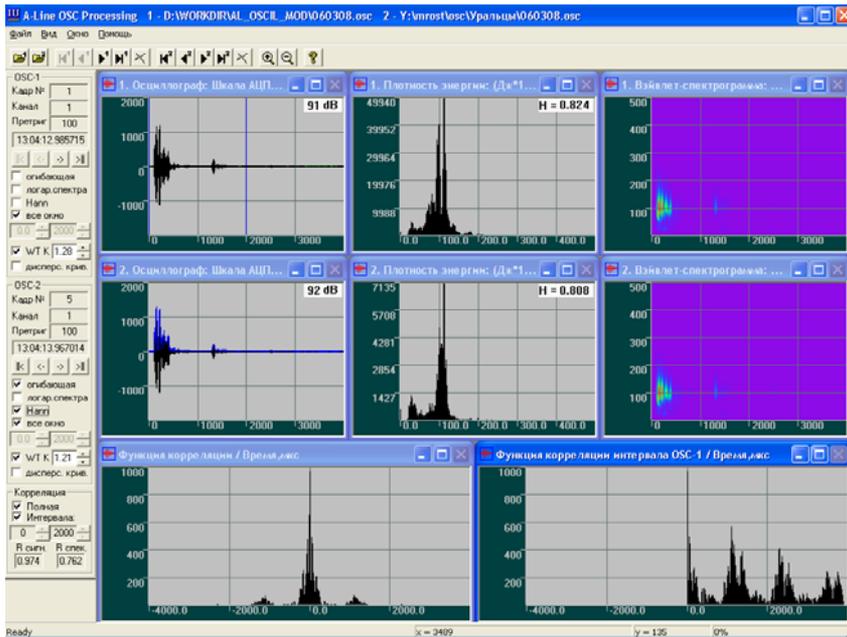


Рис. 8. Пример отображения главного окна ПО A-Line OSC Processing

Для визуализации вейвлет-спектрограмм используется традиционная цветовая диаграмма, на которой ось абсцисс соответствует времени, ось ординат – частоте, а распределение плотности энергии отображается при помощи различных оттенков цвета: фиолетовый и синий оттенки соответствуют минимальной плотности, красный и желтый - максимальной.

В отдельном окне, приведенном на рис. 9, вычисляются и отображаются дисперсионные кривые для заданных значений толщины объекта и C_L , C_T – скорости объемных продольной и поперечной волн в материале объекта. Здесь же можно выбрать желаемые моды волн Лэмба (обычно A_0 и S_0) для расчета и отображения и указать значения скорости звука в жидкости, которой может быть заполнен объект. Для удобства пользователя в

программе затабулированы значения скоростей для ряда твердых материалов и жидкостей.

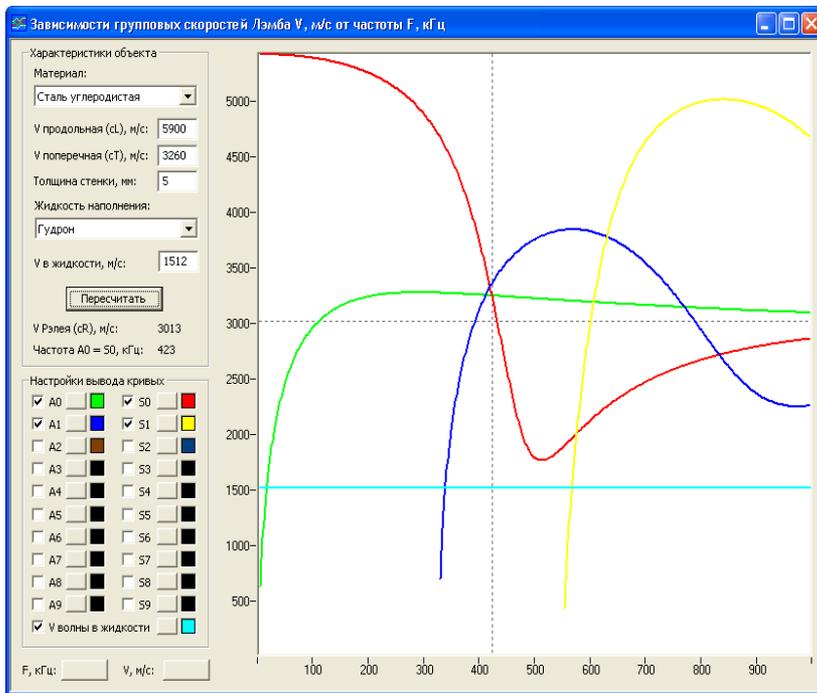


Рис. 9. Окно дисперсионных кривых

Из графика, содержащего дисперсионные кривые $v(f)$, можно получить зависимости времен прихода различных частотных составляющих сигнала на преобразователь АЭ, находящийся на расстоянии L от источника. Для этого достаточно поменять местами оси скоростей и частот, а затем преобразовать ось скоростей v в ось времен t по формуле $t = L / v + t_0$, где t_0 – момент излучения сигнала. Поскольку новые координатные оси совпадают с осями на спектрограмме, получившийся график может быть наложен на вейвлет-преобразование сигнала, а значения L и t_0 могут быть подобраны таким

образом, чтобы преобразованные дисперсионные кривые совпадали с имеющими характерную форму максимумами распределения энергии на спектрограмме [5]. Подбор значений параметров L и t_0 оперативно осуществляется при помощи сдвига мышью масштабирующих маркеров (двух белых вертикальных линий) в окне вейвлет-спектрограммы. Левый маркер соответствует приходу самой быстрой лэмбовской волны (мода S_0 при $f \rightarrow 0$), правый – приходу высокочастотных составляющих (все моды при $f \rightarrow \infty$). Горизонтальный масштабирующий маркер позволяет уточнять значение толщины стенки в случае, если оно не известно заранее. Как правило, при подборе параметров удобно ориентироваться на характерную частоту на вейвлет-спектрограмме, на которой равны значения групповых скоростей мод A_0 , S_0 и A_1 . При движении маркеров в верхнем правом углу соответствующего окна отображаются: время излучения сигнала t_0 (относительно времени начала осциллограммы), расстояние до источника L и значение толщины стенки d , соответствующие текущему варианту наложению дисперсионных кривых. Пример окна вейвлет-спектрограммы, с наложенной на него картиной дисперсионных кривых, приведен на рис. 10. Кроме того, в ряде случаев оказывается полезным знание времени прихода волны по жидкости, наполняющей объект, это время отображается вертикальной линией соответствующей цвета.

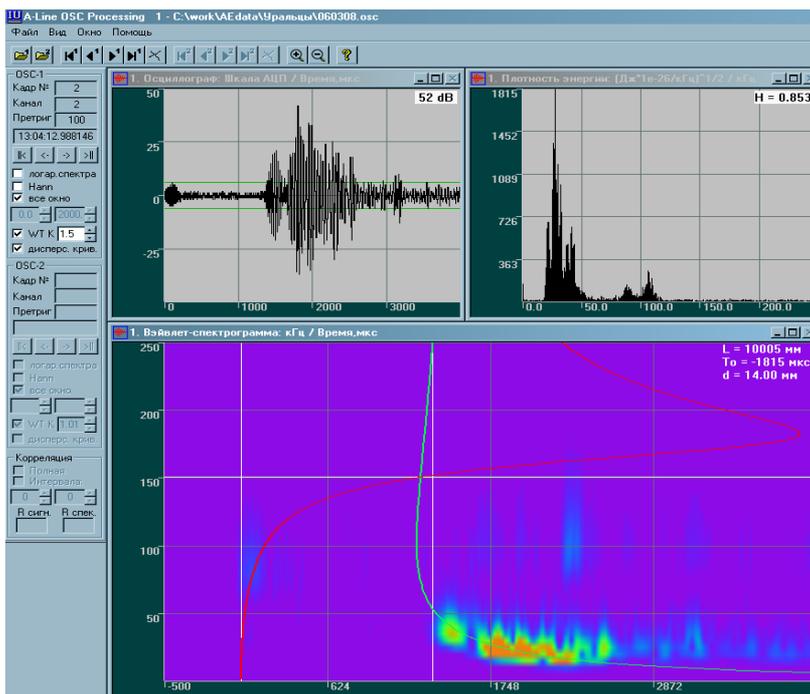


Рис. 10. Окно вейвлет-спектрограммы с результатами оценки L , t_0 и d .

В случае, когда корректное наложение дисперсионных кривых трудноосуществимо (в случае сильных шумов, при малом расстоянии между источником и ПАЭ или при наличии большого количества мод в сигнале [6]), можно использовать вейвлет-преобразование для уточнения времени прихода путем определения на спектрограмме максимума плотности энергии или определения на спектрограмме максимума плотности энергии на заранее выбранной частоте. Соответствующий этому максимуму момент времени может быть использован для локации АЭ источника вместо обычно применяемого времени пересечения порога или времени максимума амплитуды сигнала [5, 6]. В ПО A-Line OSC

Processing реализовано построение подвижных сечений вейвлет-спектрограммы линиями постоянной частоты и постоянного времени, соответствующие огибающие и мгновенные спектры дополняют картину в окнах осциллограмм и спектров. Использование значения скорости нормальной волны на частоте, соответствующей максимуму, позволяет уменьшить ошибку определения координат источника АЭ.

Список литературы

1. Kuksenko V.S.1995, Model for the transition from micro-to macrofracture, Mechanics of Jointed and Faulted Rock, Balkema/Rotterdam, p. 997.
2. Shiotani, Nakanishi, Luo, Haya, Noda. Damage assessment in railway sub-structures deteriorated using AE technique. Research Institute of Technology, Railway Technical Research Institute (Japan).
3. Ship V.V., Muravin G.B., Samoiloa I.S., Dorokhova E.G. The application of complex information parameter to acoustic emission for diagnostic during the stage of fracture.- Nondestr. Test. Eval., 1997, V.13, pp. 57-71.
4. Suzuki H., Kinjo T., Hayashi Y., Takemoto M., Ono K., Appendix by Hayashi Y., "Wavelet Transform of Acoustic Emission Signals", Journal of Acoustic Emission, Vol. 14, No.2 (1996, April-June), pp. 69-84.
5. Hamstad, M. A., A. O’Gallagher and J. Gary, “Examination of the Application of a Wavelet Transform to Acoustic Emission Signals”, Journal of Acoustic Emission, 20, 2002, pp. 39-81.
6. Cole P., Miller S. Use of advanced A.E. analysis for source discrimination using captured waveforms // 3rd MENDT - Middle East Nondestructive Testing Conference & Exhibition - 27-30 Nov. 2005 Bahrain, Manama. <http://www.ndt.net/article/mendt2005/pdf/30.pdf>.

ОБЗОР КРИТЕРИЕВ ОЦЕНКИ ИСТОЧНИКОВ АКУСТИЧЕСКОЙ ЭМИССИИ

В.И. Зайчук

(ООО «ИНТЕРЮНИС», г. Москва)

В докладе рассмотрены особенности следующих критериев оценки источников АЭ:

- амплитудный,
- интегральный,
- локально-динамический,
- интегрально-динамический (NDIS 2412-80),
- критерии Кода ASME,
- критерии технологии MONPAC,
- критерии европейского стандарта EN 14584:2005,
- критерий японского стандарта NDIS-2421-2000 для железобетонных конструкций,
- критерий Ib-value, критерий CBI, критерий RTRI и др.

Приведены особенности критериев оценки источников АЭ при проведении контроля металлических, композитных и бетонных конструкций.

Рассмотрены критерии оценки источников АЭ, реализованные в программном обеспечении АЭ системы A-Line32D (ООО «ИНТЕРЮНИС»).

Ведение

В соответствии с ПБ 03-593-03 [1] и ГОСТ Р 52727-2007 [3] результаты акустико-эмиссионного (АЭ) контроля представляют в виде перечня зарегистрированных источников АЭ, отнесенных к тому или иному классу в зависимости от значения параметров АЭ и значимости обнаруженных источников АЭ для прочности конструкции объекта контроля.

Выбор системы классификации и критериев оценки источников АЭ производят перед выполнением АЭ контроля и фиксируют в технологии контроля. В настоящее время существует большое количество критериев для оценки источников АЭ. В данном обзоре предлагается некоторая их классификация.

Среди критериев оценки источников АЭ можно выделить те, которые построены с учетом (или без учета) локации источников АЭ; с учетом (или без учета) внешних параметров (приложенной нагрузки, времени контроля и др.); с учетом статистических распределений АЭ параметров.



Дерево классификации критериев источников АЭ

Применение конкретных систем классификации источников АЭ и критериев оценки зависит от механических и акустико-эмиссионных свойств материалов контролируемых объектов.

Амплитудный критерий

В [1] изложен амплитудный критерий. Этот критерий использует локацию источников АЭ, и не использует внешние параметры. В соответствии с ним вычисляют среднюю амплитуду $A_{\text{ср}}$ не менее

трех импульсов с индивидуальной амплитудой A_t для каждого источника АЭ за выбранный интервал наблюдения. Амплитуда корректируется с учетом затухания АЭ сигналов при их распространении в материале. В предварительных экспериментах определяют граничное значение допустимой амплитуды A_t .

$$A_t = B_1 U_{\text{пор}} + B_2 A_t,$$

где $U_{\text{пор}}$ - значение порога амплитудной дискриминации;

A_t - величина превышения порога АЭ сигналом, соответствующим росту трещины в материале;

B_1 и B_2 - коэффициенты, определяемые из эксперимента. Значения этих коэффициентов находятся в пределах 0-1.

Классификацию источников производят следующим образом:

- источник I класса - источник, для которого не производилось вычисление средней амплитуды импульсов (получено менее трех импульсов за интервал наблюдения);

- источник II класса - источник, для которого выполняется неравенство:

$$A_{\text{ср}} < A_t;$$

- источник III класса - источник, для которого выполняется неравенство:

$$A_{\text{ср}} > A_t;$$

- источник IV класса - источник, включающий не менее трех зарегистрированных импульсов, для которых выполняется неравенство:

$$A_0 > A.$$

Конкретные значения A , B_1 , и B_2 зависят от материала контролируемого объекта и определяются в предварительных экспериментах.

Этот критерий сложен для реализации на практике. Специалисты ООО «ИНТЕРЮНИС» предложили этот критерий в следующем упрощенном варианте, который работает в реальном времени при сборе АЭ данных в программе A-Line32D.

Упрощенный амплитудный критерий:

- IV класс - $A \geq A_{гр.}$, $NA > A_{гр.} \geq N_{в.гр.}$
- III класс - $A \geq A_{гр.}$, $NA > A_{гр.} < N_{в.гр.}$
- II класс - $A < A_{гр.}$, $NA < A_{гр.} = N_{в.гр.}$
- I класс - $A < A_{гр.}$, $NA < A_{гр.} < N_{в.гр.}$

где A - зарегистрированная локационная амплитуда АЭ источника;

$A_{гр.}$ - граничное значение параметра (устанавливается оператором);

$N_{н.гр.}$ - нижняя граница значения параметра (устанавливается оператором);

$N_{в.гр.}$ - верхняя граница значения параметра (устанавливается оператором);

$NA > A_{гр.}$ - количество зарегистрированных событий с

локационной амплитудой, большей граничного значения;

$N_A < A_{гр}$. - количество зарегистрированных событий с локационной амплитудой, меньшей граничного значения.

Интегральный критерий

В [1] изложен интегральный критерий. Этот критерий использует локацию источников АЭ, и использует внешний параметр (время проведения АЭ контроля).

В соответствии с ним для каждой зоны вычисляют активность источников АЭ сигналов с использованием выражения:

$$F = \frac{1}{K} \sum_{k=1}^K \frac{N_{2k1}}{N_k},$$

где

$$\frac{N_{2k1}}{N_k} = \begin{cases} 1 & \text{при } N_k = 0, N_{2k1} > 0, \\ 0 & \text{при } N_k > 0, N_{2k1} = 0. \end{cases}$$
$$k = 1, 2, 3 \dots K;$$

N_k - число событий в k -м интервале оценки параметров;

N_{k+1} - число событий в $k+1$ -м интервале оценки параметров;

k - номер интервала оценки параметров. Интервал наблюдения разделяется на k интервалов оценки параметров.

Производят оценку:

$$F \ll 1;$$

$$F = 1;$$

$$F > 1$$

Вычисляют относительную силу J_k источника АЭ на каждом интервале регистрации:

$$J_k = \frac{A_k}{N \sum_{i=1}^k A_i},$$

где A_k - средняя амплитуда источника за интервал k ;

A_k - средняя амплитуда всех источников АЭ по всему объекту за исключением анализируемого за интервал k ;

N - коэффициент, определяемый в предварительных экспериментах.

Далее производят оценку источника АЭ по классам, используя матрицу:

	$J_k > 1$	$J_k >$	$J_k >$
$F \ll$	I	II	III
$F =$	II	II	III
$F >$	III	III	IV

Этот критерий очень сложен в применении, и на практике не используется при проведении АЭ контроля в реальном времени.

Локально-динамический критерий

В [1] изложен локально-динамический критерий. Этот критерий не использует локацию источников АЭ, и использует внешние параметры. В соответствии с ним оценку производят с использованием следующих параметров АЭ:

N_{i+1} - число выбросов в последующем событии;

N_i - число выбросов в предыдущем событии;

либо

E_{i+1} - энергия последующего АЭ события;

E_i - энергия предыдущего АЭ события.

Вместо энергии может быть использован параметр U_m^2 - квадрат амплитуды. Для каждого события вычисляют величины:

$$F_{i+1} = \sqrt{\left(1 + \frac{P_{i+1} - P_i}{P_{i+1}}\right)^2} - 1;$$
$$W_{i+1} = \frac{N_{i+1}}{N_i} \text{ либо } \frac{E_{i+1}}{E_i},$$

где P_{i+1} - значение внешнего параметра в момент регистрации последующего события (если в качестве параметра используют время, тогда это - промежуток времени от начала интервала наблюдения);

P_i - значение внешнего параметра в момент регистрации предыдущего события (если в качестве параметра используют

время, тогда это - промежуток времени от начала интервала наблюдения). Далее производят классификацию источника:

I класс - $W_{ин} \ll V_{ин}$,

II класс - $W_{ин} = V_{ин}$,

III класс - $W_{ин} > V_{ин}$,

IV класс - $W_{ин} \gg V_{ин}$.

Этот критерий сложен для реализации на практике. Специалисты ООО «ИНТЕРЮНИС» предложили этот критерий в следующем упрощенном варианте, который работает в реальном времени при сборе АЭ данных в программе A-Line32D.

Упрощенный локально-динамический критерий.

Этот критерий характеризует процесс развития дефектов во времени в зависимости от параметра нагружения, т.е.

$$N \sim \alpha p(t)^n$$

где N - число зарегистрированных событий;

p - параметр нагружения;

n - показатель степени.

В этом случае степень опасности АЭ источника классифицируют следующим образом:

$0 > n < 1$ - источник опасности I класса;

$n \geq 1$ - источник опасности II класса;

$1 > n < 6$ - источник опасности III класса;

$n \geq 6$ - источник опасности IV класса.

Интегрально-динамический критерий (Стандарт NDIS 2412-80)

В [1] и [10] изложен интегрально-динамический критерий для стальных сосудов. Этот критерий использует локацию источников АЭ, и не использует внешние параметры. В соответствии с ним для каждого источника определяют коэффициент концентрации C :

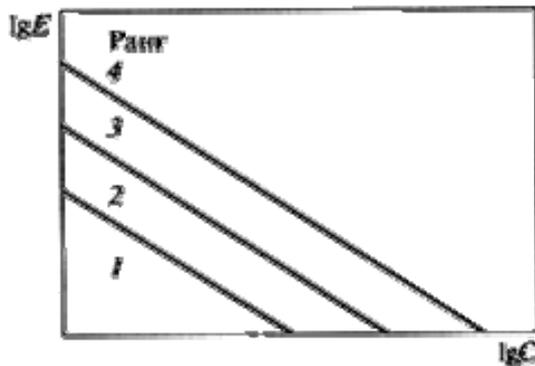
$$C = N_1 / R^3,$$

где R - средний радиус источника АЭ.

Для каждого источника определяют суммарную энергию

$$E_i = \sum_{j=1}^k (A_{ij})^2 N_{ij}.$$

Оценивают положение точки на плоскости в координатах $\lg C - \lg E$. Устанавливается ранг источника по рисунку:



Положение разграничивающих линий определяется предварительными экспериментами.

Формируют величину P , характеризующую динамику энерговыделения источника на интервале наблюдения:

$$P = \frac{\sum_{k=1}^K k \left(\frac{A_{2k1}}{A_2} \right)^2}{\sum_{k=1}^K k},$$

$$P = \begin{cases} 1 & \text{при } A_2 = 0 \text{ и } A_{2k1} > 0 \\ k-1, 2, 3, \dots, K & \\ 0 & \text{при } A_2 > 0, A_{2k1} = 0 \end{cases}$$

Устанавливается тип источника согласно таблице:

P	Тип
$P \ll 1$	1
$P < 1$	2
$P = 1$	3
$P > 1$	4

Производят классификацию источника согласно таблице:

Тип	Ранг			
	1	2	3	4
1	I	I	II	III
2	I	II	II	III
3	I	II	III	III
4	I	III	IV	IV

Этот критерий очень сложен в применении и на практике не используется при проведении АЭ контроля в реальном времени.

Критерии Кода ASME

В [1] и [5] изложен критерий кода ASME для металлических сосудов. Этот критерий использует зонную локацию источников АЭ, и использует внешние параметры. В соответствии с ним оценка результатов контроля производится по таблице:

	Эмиссия в процессе выдержки нагрузки	Скорость счета	Число импульсов	Число импульсов с большой амплитудой	MARSE или амплитуда	Активность	Порог, дБ
Первое нагружение. Сосуды давления, не прошедшие термообработку после проведения сварочных работ.	Не более чем E_{Σ} импульсов за время $T_{\text{ж}}$	Не использует ся	Не использует ся	Не более E_{Δ} импульсов выше заданной амплитуды	MARSE или амплитуда импульсов не увеличивается с увеличением нагрузки	Активность не увеличивается с увеличением нагрузки	$F_{\text{ж}}$
Прочие сосуды давления	Не более чем E_{Σ} импульсов за время $T_{\text{ж}}$	Менее чем N_T выбросов на ПАЕ при заданном увеличении и нагрузки	Не более E_T импульсов выше заданной амплитуды	Не более E_{Δ} импульсов выше заданной амплитуды	MARSE или амплитуда импульсов не увеличивается с увеличением нагрузки	Активность не увеличивается с увеличением нагрузки	$F_{\text{ж}}$

Примечания:

а) E_{Σ} , N_T , E_T и E_{Δ} являются заданными допустимыми значениями параметров АЭ;

б) $F_{\text{ж}}$ является заданным порогом;

в) $T_{\text{ж}}$ является заданным временем выдержки.

Конкретные значения параметров зависят от условий контроля, материала контролируемого объекта и его состояния.

В [6] изложен критерий кода ASME для композитных сосудов.

Система классификации источников АЭ в технологии MONPAC

В [1], [8] и [9] изложен критерий технологии MONPAC для металлических сосудов фирмы РАС. Этот критерий использует зонную локацию источников АЭ, и использует внешние параметры. В соответствии с ним источники АЭ разделяются на классы в зависимости от значения параметров «Силовой индекс» и «Исторический индекс». «Силовой индекс» S_{σ} определяется выражением

$$S_{\sigma} = \frac{1}{10} \sum_{i=1}^M S_{\sigma i},$$

где $S_{\sigma i}$ - сила сигнала i -го события, представляющая собой удвоенную площадь под огибающей импульса АЭ;

$S_{\sigma i}/2 = \text{MARSE}$. Исторический индекс определяется выражением

$$H(t) = \frac{N}{N-K} \times \frac{\sum_{i=1}^N S_{\sigma i}}{\sum_{i=1}^N S_{\sigma i}}.$$

После вычисления значений индексов для каждого зарегистрированного импульса АЭ производят классификацию источников в соответствии с таблицей и рисунком:

Класс источников АЭ	Описание источника АЭ
<i>A</i>	Незначительный источник, регистрируется для учета в будущих испытаниях
<i>B</i>	Источник регистрируется для учета в будущих испытаниях, осматривается поверхность объекта для выявления поверхностных дефектов, вида коррозии, питтинга, трещин и др
<i>C</i>	Источник свидетельствует о наличии дефекта, требующего последующего анализа данных АЭ контроля, повторного АЭ контроля или контроля с использованием других методов
<i>D</i>	Источник свидетельствует о наличии значительного дефекта, требующего последующего контроля с использованием других методов
<i>E</i>	Источник свидетельствует о наличии большого дефекта, требующего немедленного прекращения нагружения и контроля другими методами



Диаграмма классификации источников АЭ в технологии МОНРАС

Аналог этого критерия, который работает в реальном времени при сборе АЭ данных реализован специалистами ООО «ИНТЕРЮНИС» в программе A-Line 32D.

Критерий европейского стандарта EN 14584:2005

В [7] изложен критерий для планарной локации металлических сосудов по европейскому стандарту. Этот критерий использует локацию источников АЭ, и использует внешний параметр (нагрузка).

В соответствии с ним источники АЭ оценивают по следующим критериям:

N_1 – число залоцированных сигналов АЭ с локационной амплитудой выше A_1 ;

N_2 – число залоцированных сигналов АЭ с локационной амплитудой выше A_2 внутри зоны диаметром Z ;

N_3 – число залоцированных сигналов АЭ с локационной амплитудой выше A_2 в период выдержки постоянного уровня нагрузки t_h (после 2 мин от начала выдержки).

В данной таблице приведены примерные значения этих параметров.

Параметр	Примерное значение
A_1	100 дБ
A_2	88 дБ
N_1	3
N_2	10
N_3	2
Z	$0,1 d_{\max}$
t_h	5 мин

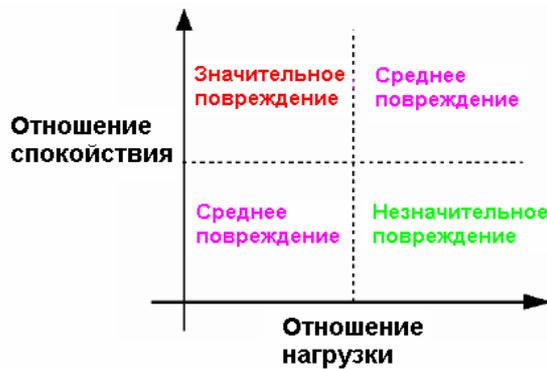
Критерии для железобетонных конструкций

В соответствии с критерием, изложенным в японском стандарте NDIS-2421-2000 [11], определяется степень повреждения ж/б балок на основе следующих отношений:

Отношение нагрузки (Load ratio) = отношение нагрузки при начале АЭ активности при последующей нагрузке к предыдущий нагрузке.

Отношение спокойствия (Calm ratio) = отношение числа кумулятивных АЭ событий во время разгрузки к общему числу АЭ событий во время последнего цикла нагружения до максимума.

Для расчета этих отношений обычно используются наиболее активные АЭ каналы.



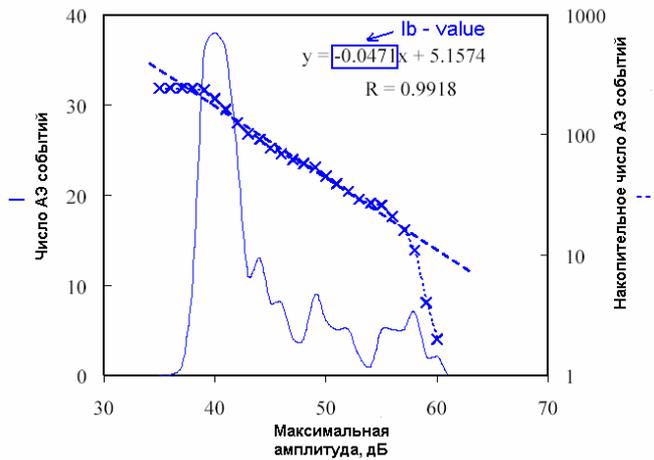
Оценочная таблица из NDIS-2421

Для определения серьезности повреждений, возникающих в отремонтированных бетонных балках используется критерий *СВІ (Concrete Beam Integrity)* *Отношение целостности бетонной балки* = отношение нагрузки при начале АЭ к максимуму предыдущей нагрузки.

Для бетонных конструкций используют, также, критерий – *усовершенствованный b-показатель (Ib-value)*, который определяется по отрицательному углу наклона графика кумулятивного амплитудного распределения АЭ сигналов.

Значение *Ib-показателя* около 0,05 характеризует серьезное повреждение бетонной конструкции, а значение около 0,1 – незначительное повреждение.

Необходимо подчеркнуть, что оценка повреждения бетонной конструкции на основе *Ib-показателя* не требует знания внешнего параметра (нагрузки, деформации и т.п.).



Амплитудные распределения в бетонной опоре моста

Расчет *Ib-показателя* для амплитудного распределения

Отмечено, что по мере развития повреждения в бетонной конструкции АЭ активность увеличивается не только при нагрузке, но и при разгрузке.



Представление АЭ активности с развитием повреждения

Для ж/б конструкций используют, также, критерий *отношение Повторной нагрузки в начале АЭ активности к относительному максимуму нагрузки за период контроля (RTRI)*. Этот критерий эффективен при АЭ мониторинге железнодорожных бетонных конструкций в процессе эксплуатации.

Критерии оценки источников АЭ при проведении АЭ контроля стенки резервуаров для нефтепродуктов.

В документе [4] предложен критерий оценки АЭ контроля стенки стальных вертикальных сварных резервуаров для нефти и нефтепродуктов (РВС), разработанный специалистами ООО «ИНТЕРЮНИС».

По результатам планарной локации АЭ событий на стенке резервуара выделяют кластеры (группы лоцированных АЭ событий). Минимальное количество лоцированных АЭ событий для формирования кластера рекомендуется выбирать равным 3.

Регистрируют количество лоцированных АЭ событий в каждом кластере и координата центра кластера.

По результатам зонной локации АЭ событий на стенке резервуара выделяют акустически активные АЭ каналы и зону вокруг соответствующего ПАЭ, равную $1,5 \cdot L_{\text{зон}}$ (где $L_{\text{зон}}$ – радиус зоны уверенного приема для соответствующего ПАЭ) без точного значения координат.

Обнаруженные акустически активные зоны на стенке резервуара рекомендуется оценивать по следующим 3-м показателям и критериям:

- К1: – регистрация АЭ в течение выдержки постоянной нагрузки указывает на пластическую деформацию металла или на подрастающий дефект. Должно быть не более 3-х АЭ сигналов с амплитудой выше порога на 12 дБ по АЭ каналу после первых 2-х минут выдержки постоянного уровня разлива (90, 100 и 105% от максимального рабочего уровня);

- К2: – значение числа АЭ сигналов за определенный промежуток времени указывает на скорость развития и опасность дефектной области. Должно быть не более 10-ти АЭ сигналов с амплитудой выше порога на 12 дБ по АЭ каналу при каждом ступенчатом увеличении уровня разлива и выдержке соответствующего постоянного уровня разлива (90, 100 и 105% от максимального рабочего уровня);

- К3: – регистрация АЭ сигналов с большими амплитудами указывает на присутствие развивающейся трещины. Не должно

быть АЭ сигналов с локационной амплитудой (с учетом коэффициента затухания и расстояния до источника АЭ) более 95 дБ по АЭ каналу.

Зарегистрированные источники АЭ в акустически активных зонах на стенке резервуара относят к 4-м классам согласно таблице:

Класс источника АЭ	Отношение к классу
I (пассивный)	АЭ сигналы удовлетворяют всем трем критериям (К1, К2 и К3)
II (активный)	АЭ сигналы не удовлетворяют одному из критериев (К1, К2 или К3)
III (критически активный)	АЭ сигналы не удовлетворяют двум из критериев (К1, К2 или К3)
IV (катастрофически активный)	АЭ сигналы не удовлетворяют всем трем критериям (К1, К2 и К3)

Данный обзор критериев оценки источников АЭ будет дополняться и развиваться. Следует подчеркнуть, что невозможно создать универсальный критерий. Каждый тип объекта контроля требует разработки соответствующей методики АЭ контроля и соответствующих критериев оценки.

Специалисты ООО «ИНТЕРЮНИС» постоянно развивают возможности программы сбора и обработки АЭ данных A-Line32D в части критериев оценки источников АЭ, с учетом своего опыта, и пожеланий и опыта своих клиентов.

Список литературы

1. ПБ 03-593-03. Правила организации и проведения акустико-эмиссионного контроля сосудов, аппаратов, котлов и технологических трубопроводов.

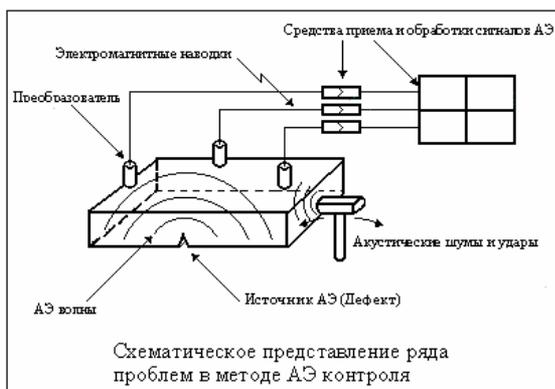
2. ГОСТ 27655-88. Акустическая эмиссия. Термины, определения и обозначения.
3. ГОСТ Р 52727-2007. Техническая диагностика. Акустико-эмиссионная диагностика. Общие требования.
4. СТО-03-001-06. Экспертиза промышленной безопасности стальных вертикальных сварных резервуаров для нефти и нефтепродуктов, М., НПС «РИСКОМ», 2006.
5. ASME Boiler and Pressure Vessel Code. Section V. Nondestructive Examination. Article 12. Acoustic Emission Examination of Metallic Vessels During Pressure Testing. American Society of Mechanical Engineers (ASME), 1989.
6. ASME Boiler and Pressure Vessel Code. Section V. Nondestructive Examination. Article 11. Acoustic Emission Examination of Fiber-Reinforced Plastic Vessels. American Society of Mechanical Engineers (ASME), 1989.
7. EN 14584:2005. Non-Destructive Testing – Acoustic Emission – Examination of Metallic Pressure Equipment during Proof Testing – Planar Location of AE Sources, National standards authority of Ireland, 2005.
8. MONPAC TECHNOLOGY PACKAGE. Acoustic Emission Testing of Metal Vessel., MONSANTO Chemical Company, 1986.
9. MONPAC-PLUS Procedure for Acoustic Emission Testing of Metal Tanks/Vessels, Physical Acoustics Corporation (PAC), Princeton, 1992.
10. NDIS 2412-1980. Acoustic Emission Testing of Spherical Pressure Vessel Made of High Tensile Strength Steel and Classification of Test Results, The Japanese Society for Non-Destructive Inspection, 1980.
11. NDIS-2421-2000. Recommended practice for in situ monitoring of concrete structures by acoustic emission, The Japanese Society for Non-Destructive Inspection (NDIS), 2000.

НАУЧНЫЕ ОСНОВЫ АКУСТИКО-ЭМИССИОННОЙ ДИАГНОСТИКИ

В.И.Иванов

(ОАО «Оргэнергонефть», УЦ «Самара», г. Самара)

В системе экспертизы промышленной безопасности метод акустической эмиссии (АЭ) занял достойное место в ряду методов неразрушающего контроля (НК). Однако потенциальные возможности метода АЭ позволяют отнести его к методам технической диагностики (ТД). В современном понимании термина ТД это - определение технического состояния объекта с целью оценки безопасности и прогнозирования ресурса.



Применение метода АЭ для контроля технических устройств (ТУ) обосновано научными исследованиями, проведенными в последние 30 лет. Решены, в основном, следующие

научные проблемы в области АЭ:

- Прояснены физические процессы, приводящие к излучению акустических сигналов, выяснен механизм формирования сигналов АЭ.

- Предложены модели излучения сигналов АЭ источником.
- Проведен анализ процессов распространения, приема и преобразования сигналов АЭ.
- Сформирована система оценки источников АЭ (оценка состояния объекта по параметрам АЭ: ПБ 03-593-03).

Все эти задачи решены в том объеме, которые позволяют использовать метод АЭ в промышленности с большой пользой. Метод АЭ занял достойное место в ряду других методов НК.

В отмеченных направлениях, однако, много нерешенных задач. Современные требования к безопасности технических объектов требуют новых подходов, обеспечивающих количественные оценки показателей безопасности, рисков, ресурса. В каждом из перечисленных направлений имеется еще ряд актуальных частных задач и глобальных проблем, которые необходимо решить для обеспечения и повышения достоверности информации, получаемой при выполнении ТД и АЭ диагностики (АЭД).

Этап, который обеспечил полезное применение метода АЭ как метода НК в промышленности закончился. Наступил этап разработки основ АЭ диагностики.

В докладе приведена информация о научных представлениях, моделях и подтверждающих их экспериментах, которые послужили базой для промышленного использования метода АЭ как метода НК.

Для дальнейшего развития метода АЭ как метода ТД, необходимо решение следующих глубоких и принципиальных проблем:

- Адекватная оценка источника АЭ по параметрам принятого сигнала.
- Совершенствование и разработка новых методов выделения сигналов АЭ из шумов с тем, чтобы появилась возможность выделять сигнал АЭ при уровне шумов равном или превышающем уровень АЭ.
- Количественное представление следующих характеристик АЭД и включение их в НТД:
 - Вероятность обнаружения дефекта (ВОД-диаграмма).
 - Рабочая характеристики приема сигналов АЭ (РХП АЭ).
 - Оценка рисков по параметрам АЭ.
 - Определение этапов жизни объекта диагностирования и прогнозирование характеристик жизненного цикла объекта.

ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДА АЭ В СИСТЕМЕ ТЕХНИЧЕСКОГО ДИАГНОСТИРОВАНИЯ ОБОРУДОВАНИЯ ПРОМЫШЛЕННЫХ ПРЕДПРИЯТИЙ

Н.Н. Колоколова
(НПП «Ультратест», г. Обнинск)

Акустическая эмиссия (АЭ)– один из сравнительно новых пассивных методов неразрушающего контроля (НК), активно развивающихся в последние годы.

Физическая основа метода основана на улавливании ультразвуковых сигналов в диапазоне частот от 10 кГц до 2 МГц, излучаемых материалом при каких-либо динамических структурных изменениях (в том числе развитие трещины) в нем, при прохождении жидких и/или газообразных сред через узкие отверстия (контролируемый объект имеет сквозной не развивающийся дефект), а также при трении друг о друга берегов трещины без ее развития.

Метод АЭ обладает рядом преимуществ перед другими методами НК, такими как:

- высокая чувствительность, что позволяет выявлять в лабораторных условиях продвижение трещины протяженностью 1 мкм на величину 1 мкм при применении

высококчувствительной аппаратуры, с высоким соотношением сигнал/шум;

- дистанционность и интегральность;
- выявление только развивающихся дефектов, что дает возможность классифицировать дефекты по степени их опасности для объекта;
- для АЭ метода не имеет значение форма, ориентация и размеры дефекта; АЭ сигналы несут информацию о степени опасности дефекта и о его местоположении;
- АЭ метод применим для металлов, композиционных материалов, керамики, бетонов;
- оперативность, что позволяет в режиме реального времени оценить техническое состояние объекта и предотвратить его разрушение.

АЭ контроль имеет преимущества перед другими методами НК по соотношению эффективность / стоимость, эффективность / трудоемкость.

К основным недостаткам метода следует отнести:

- сложность выделения полезного сигнала из потока регистрируемых данных;
- отсутствие эталонов источников АЭ сигналов различной природы, а следовательно и четких критериев оценки полученной АЭ информации;
- все критерии классификации источников сигналов носят рекомендательный характер, что позволяет по разному

оценивать результаты контроля в зависимости от выбранного критерия и уровня квалификации персонала;

- идентификация дефекта возможна только после обследования зоны, где выявлен источник АЭ, другими методами НК.

Развитие АЭ метода до 1997 г. у нас в стране сдерживалось отсутствием единой нормативно-технической и методической базы. До 1997 г. существовал всего один ГОСТ В 1996 г. при теперешнем Ростехнадзоре из числа ведущих специалистов в области акустической эмиссии создан Экспертно-консультативный Совет по проблемам применения акустической эмиссии на объектах, подконтрольных Ростехнадзору. Итогом работы Совета является разработка и введение в действие 3-х основных нормативных документов по акустической эмиссии:

- Правила организации и проведения акустико-эмиссионного контроля сосудов, аппаратов, котлов и технологических трубопроводов. ПБ 03-593-03. Это основной организационно-технический и методический документ, регламентирующий проведение АЭ контроля на объектах, подконтрольных Ростехнадзора.
- Требования к акустико-эмиссионной аппаратуре, используемой для контроля опасных производственных объектов. РД-03-299-99. В документе изложены основные требования к АЭ аппаратуре I (универсальные АЭ системы) и II (приборы широкого применения) классов. Классификация аппаратуры проведена по четырем классам в

зависимости от ее сложности (количество информационно-измерительных каналов), места использования (лабораторные, полевые), способа использования (стационарные, переносные, мобильные), области применения (универсальные, специализированные). Документ содержит ряд специальных разделов, относящихся к аттестации АЭ аппаратуры.

- Требования к преобразователям акустикой эмиссии, применяемым для контроля опасных производственных объектов. РД-03-300-99. Применение АЭ преобразователей, соответствующих требованиям данного документа позволяет повысить достоверность результатов контроля.

Создание Системы экспертизы промышленной безопасности и Системы НК Ростехнадзора дало новый толчок более широкому внедрению метода в практику его применения на промышленных объектах.

В нормативно-методической базе Системы ЭПБ имеется ряд документов, которые расширяют границы применения метода АЭ и по сути регламентируют применение этого метода не как дополнительного, а как основного метода (ПБ 09-595-03, РД 09-244-98, РД 410-01). В то же время ряд документов имеющейся нормативно методической базы ЭПБ содержат неоднозначные, порой противоречащие положения, касающиеся применения метода АЭ при техническом диагностировании и техническом освидетельствовании оборудования (ПБ 03-576-03, ПБ 03-593-03, РД 03-421-01).

В настоящее время Экспертным Советом по АЭ одобрено или рекомендовано к доработке ряд методических документов по техническому диагностированию, в которых предусмотрено применение метода АЭ в равноправном сочетании с традиционными методами НК как при техническом диагностировании оборудования, так и при мониторинге технического состояния. Это документы, создаваемые организациями, входящими в Союз «РИСКОМ» и др.фирмами.

Существенной потерей в плане применения метода АЭ явилась отмена действующих до начала реформы технического регулирования всех методических документов, разработанных и согласованных Госгортехнадзором как ведущими отраслевыми институтами (ГИАП, НИИХИММАШ, НИКИМТ), так специализированными организациями, которые регламентировали различные схемы применения метода АЭ при техническом диагностировании и техническом освидетельствовании технологического оборудования. Разрабатываемые в условиях переходного периода реформы технического регулирования и связанной с ним правовой неразберихой методические материалы не имеют статуса официального документа и не являются лигитивными для представителей надзорных органов.

Несмотря на обозначенные выше формальные сложности, применение метода АЭ все чаще стало присутствовать в Программах работ по натурному обследованию объектов при проведении технического диагностирования и ЭПБ по регламентируемым ПБ 03-593-3 схемам. Расширилась география

фирм, практикующий метод АЭ, увеличился количественный состав специалистов по АЭ методу, имеющий опыт применения по различным схемам:

- лабораторные исследования;
- сопровождение пневматических испытаний сосудов, работающих под давлением, и трубопроводов высокого давления;
- диагностический контроль в целом объектов,;
- решение вопроса о возможности допуска к эксплуатации объекта с дефектом, выявленным другими методами НК;
- мониторинг динамики развития выявленного ранее дефекта;
- комплексный мониторинг состояния объекта.

Опыт применения метода АЭ и практика технического диагностирования подтверждают эффективность метода в плане выявления опасных с точки зрения разрушения дефектов, и контролепригодность этим методом основных технических устройств или их частей и узлов, эксплуатируемых на промышленных предприятиях всех отраслей.

КОМПЛЕКСНЫЙ МОНИТОРИНГ ОБОРУДОВАНИЯ ОПО

В.Н. Костюков, С.Н. Бойченко, А.П. Науменко,

Е.В. Тарасов

(НПЦ «Динамика», г. Омск)

Обеспечение безопасной, безаварийной эксплуатации технологического оборудования опасных производств, существенным образом влияющего на технико-экономические показатели производства и возникновение техногенных инцидентов, неразрывно связано с контролем его технического состояния в процессе эксплуатации в реальном времени для обеспечения наблюдаемости его состояния.

Выбор и обоснование объектов мониторинга (ОМ) осуществляется путем анализа технологической схемы производства с учетом их влияния на технологический процесс и взрывопожароопасность производства. В результате, определяются категории опасности объектов [1], которые и подлежат оснащению системами мониторинга технического состояния. Конечным итогом анализа производства является разработка программы оснащения предприятия системами мониторинга и перехода на эксплуатацию оборудования по фактическому техническому состоянию.

Технологическое оборудование современных производств, как правило, включает динамическое оборудование (насосы, компрессоры, воздуходувки и т.п.) и статическое оборудование

(колонны, резервуары, трубопроводы и т.п.). Для диагностики и мониторинга состояния сегодня часто используются различные технические средства. Мировая тенденция к узкопрофильной специализации организаций по разработке технологий и стационарных и переносных средств диагностики конкретного типа оборудования приводит к появлению систем, которые произведены различными фирмами. Многие из этих систем практически оказываются несовместимыми между собой ни по электрическим, ни по информационным параметрам, что не позволяет интегрировать их в единое информационное пространство АСУ ТП предприятия.

В то же время, принципы построения системы КОМПАКС® [2, 3] позволяют достаточно просто конфигурировать её программно-аппаратные средства как для мониторинга состояния самого разнообразного динамического оборудования (центробежные консольные, двухопорные и поршневые насосы, воздухо- и газодувки, вентиляторы и аппараты воздушного охлаждения, центробежные и поршневые компрессоры), так и для мониторинга статического оборудования (реакторы, колонны, сосуды, теплообменники, трубопроводы и т.д.).

Важнейшим фактором, определяющим надежность мониторинга, является представление и хранение результатов мониторинга в едином информационном пространстве, что обеспечивается путем стандартизации номенклатуры, формата и представления результатов мониторинга.

Примером комплексного подхода к мониторингу состояния оборудования опасного производства является система КОМПАКС®,

обеспечивающая наблюдаемость динамического и важнейшего статического оборудования установки 21-10/3М ОАО «Газпромнефть-Омский НПЗ» (рис. 1) и установки «Изомеризация» ОАО «Ачинский НПЗ ВНК».



Рис. 1. Коксовые камеры установки замедленного коксования

Процесс коксования является одним из широко применяемых для переработки тяжелых нефтяных остатков. Он позволяет увеличить глубину переработки нефти и соответственно повысить доходность предприятия. Выпуск продукции на установке 21-10/3М обеспечивает сложный технологический процесс, в котором участвует несколько сотен единиц машинного и колонно-емкостного оборудования, при этом сбой в работе любого элемента в технологической цепочке может привести не только к снижению

качества или уменьшению объема выпускаемой продукции, но и к аварийному останову.

Для обеспечения надежности производства необходимо в реальном времени знать техническое состояние эксплуатируемого оборудования, точно знать узлы с критическим техническим состоянием («Недопустимо») и принимать своевременные меры для предотвращения инцидентов.

Для решения этих задач в 1995 г. в ОАО «Газпромнефть-Омский НПЗ» была принята программа поэтапного обеспечения оборудования установки 21-10/3М мониторингом технического состояния в реальном времени и в этом же году оснащены системой 31 основной насосный агрегат и два аппарата воздушного охлаждения. Система КОМПАКС[®] в автоматическом режиме производит оценку технического состояния машинного оборудования по параметрам вибрации [4], температуре, потребляемому току и обеспечивает визуальное отображение текущего технического состояния цветовыми пиктограммами (зеленый цвет – «Допустимо», желтый – «Требуется принятия мер», красный – «Недопустимо»). Система выдает предупреждение персоналу посредством речевого сообщения и рекомендаций по ближайшим неотложным действиям, которые необходимо провести для обеспечения безаварийной эксплуатации оборудования. Все измеряемые системой параметры накапливаются в базах данных за различные интервалы – от 12 ч до 9 лет (12 ч, 4 и 40 сут, 1 год, 9 лет).

Оснащение машинного оборудования стационарной системой КОМПАКС® позволило устранить аварии и исключить, так называемые, «внезапные» отказы.

Система КОМПАКС® обеспечивает надежное диагностирование дефектов подшипников, нарушение режимов смазки, кавитационных режимов работы насосов, нарушения центровки валов и балансировки вращающихся частей, ослаблений креплений насосов и электродвигателей, отказов торцовых уплотнений, более 70% которых вызвано недопустимо высокими уровнями вибрации насосов и электродвигателей.

Проведенный анализ статистики отказов показал, что благодаря системе КОМПАКС® более чем в 12 раз снизилось число внезапных для персонала отказов; более чем в 4 раза сократилось число и соответственно затраты на ремонтные работы. Произошло качественное перераспределение объемов ремонтов (капитальных и средних) в сторону текущих ремонтов и текущего обслуживания. Количество дорогостоящих капитальных ремонтов сократилось в более чем 10 раз.

В то время как проблемы с эксплуатацией машинного оборудования в основном были решены, на первый план вышли проблемы с эксплуатацией самих коксовых камер и в 1998 г. системой КОМПАКС® оснащена коксовая камера № 3.

В соответствии с Регламентом установки 21-10/3М при ведении технологического процесса следует строго соблюдать температурные режимы работы камеры, для этого необходимо

обеспечить контроль абсолютной величины температуры стенки камеры и скорости её изменения, а также контроль изменений линейных размеров камеры и скорости их изменения. Для этого на корпус коксовой камеры, согласно разработанному НПЦ «Динамика» проекту, были установлены 3 репера на верхней горловине (отметка 21 м) по радиусу, отстоящие друг от друга на 120° для контроля изменений линейных размеров камеры. Кроме того, на корпус камеры по проектным отметкам установлены 29 поверхностных термопар для контроля температуры стенок.

Использование системы КОМПАКС® на коксовой камере № 3 в реальных производственных условиях позволило впервые произвести анализ ее работы и установить участки регламента, на которых возникают критические напряженно-деформированные состояния корпуса. Система КОМПАКС® контролирует техническое состояние коксовой камеры по зонам температурного контроля. Автоматически система определяет наихудшую зону, фиксирует температурные параметры и выдает сообщение экспертной системы по данной зоне, например о «недопустимой скорости изменения и разности температур» возникших при охлаждении кокса. Установлено, что опасные деформации коксовой камеры возникают в начале процессов опрессовки, коксования и охлаждения кокса холодной водой (рис. 2, 3).

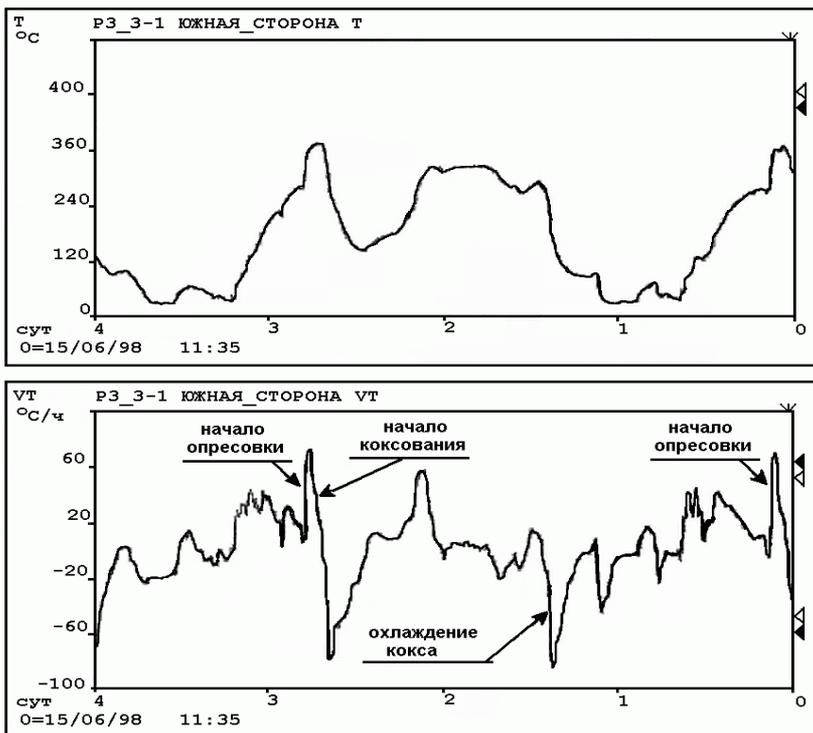


Рис. 2. – 4-суточные тренды параметров температуры (T) и скорости изменения температуры (VT) с южной стороны коксовой камеры № 3.

Недопустимые скорости изменения температуры (VT) на участках:

- 1 – начало опрессовки;
- 2 – начало коксования;
- 3 – охлаждение кокса.

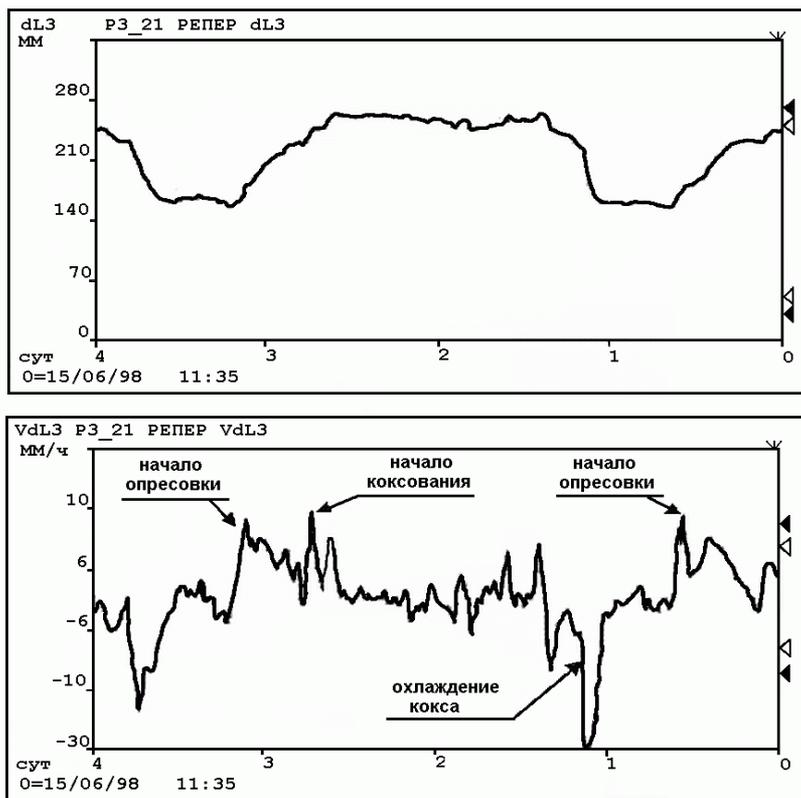


Рис. 3. – 4-суточные тренды параметров изменения линейных размеров ($dL3$) и скорости изменения размеров ($VdL3$) коксовой камеры № 3.

Недопустимые скорости изменения линейных размеров ($VdL3$) на участках:

- 1 – начало опрессовки;*
- 2 – начало коксования;*
- 3 – охлаждение кокса.*

Прогрев коксовой камеры проходит равномерно по всему объему, однако в момент начала процесса опрессовки появляется скачок по скорости роста температуры в зону «Недопустимо» (НДП), на проектной отметке 150 ($VT = 61,85^\circ\text{C}/\text{ч}$), 9 150 ($VT = 63,8^\circ\text{C}/\text{ч}$), 18 500 ($VT = 68,7^\circ\text{C}/\text{ч}$). Видно, что скорость изменения

температуры в период опрессовки зависит от высоты. Это обусловлено тем, что при прогреве паром низ камеры прогревается в достаточной степени и быстро, а верх не успевает прогреться. В результате этого происходит скачкообразное увеличение линейных размеров коксовой камеры с недопустимой скоростью роста $V\Delta L = 20$ мм/ч (рис. 3).

В дальнейшей низ камеры прогревается до температуры 300-320°C и в момент начала процесса коксования, когда подается продукт с температурой 450°C, происходит тепловой удар внизу камеры, при котором скорость изменения температуры превышает порог НДП и составляет 69,11°C/ч. В начале процесса коксования происходит увеличение линейных размеров коксовой камеры со скоростью роста в зоне «Требуется принятия мер» $V\Delta L = 15,5$ мм/ч. Далее процесс коксования для камеры идет достаточно стабильно со скоростями изменения температуры в зоне «Допустимо». Однако внизу камеры по истечении 3 ч от начала процесса коксования температура снижается с 377°C до 216°C с недопустимой скоростью изменения ($VT = 90$ °C/ч). Это обусловлено отложением кокса на стенках реактора и снижением теплоотдачи. Постепенно, в течение 8 ч, отложившаяся на стенках внизу реактора, масса кокса прогревается и температура восстанавливается до первоначального значения 377°C (рис. 2).

Наиболее критическая ситуация (опасные деформации) возникает при охлаждении кокса холодной водой. В то время, когда камера заполнена продуктом, помимо пластических деформаций

корпуса, возникают дополнительные механические напряжения за счет того, что кокс не позволяет материалу камеры равномерно сжиматься. По окончании процесса коксования и пропарки кокса в камеру подается холодная вода (20°C) для охлаждения. Возникает резкий перепад температуры – с 280 до 20°C, что приводит к недопустимым скоростям изменения температуры поверхности реактора. При подаче воды с расходом 20 т/ч скорость $VT = 143^\circ \text{C/ч}$ на верхних отметках, а в середине и внизу при расходе воды 5 т/ч – $VT = 122^\circ \text{C/ч}$ (см. рис. 2). При охлаждении кокса водой происходит резкое изменение линейных размеров коксовой камеры с недопустимой скоростью ($V\Delta L = 33,8 \text{ мм/ч}$, рис. 3). При этом на отдельных участках корпуса скорости изменения температуры (VT) и линейных размеров ($V\Delta L$) камеры превышают порог НДП установленный Регламентом (табл. 1) более чем в два раза.

Таблица 1

Оценка технического состояния	Температура	Скорость изменения температуры	Изменение линейных размеров	Скорость изменения линейных размеров
	T, °C	VT, °C/час	ΔL , мм	$V\Delta L$, мм/час
«Требуется принятия мер» (ТПМ)	450	50	250	10
«Недопустимо» (НДП)	490	60	270	15

Опасные деформации наблюдаются при каждом технологическом цикле, что приводит к появлению усталостных повреждений стенок коксовой камеры, отслоению плакирующего

слоя, перегреву стенок реакторов. Для обеспечения диагностики состояния корпуса коксовых камер установки 21-10/3М в 2000 г. произведено их оснащение системой акустико-эмиссионного мониторинга КОМПАКС®-АЭ. Для этого на каждую камеру установлено по 6 акустико-эмиссионных датчиков (рис. 4).



Рис. 4. Установка датчиков и модулей на коксовой камере

Система позволяет на технологическом режиме контролировать состояния материала, определять наличие, месторасположение и категорию источников акустической эмиссии, а также визуализирует состояние камеры на развертке по зонам локации. При зарождении и развитии дефекта в стенке камеры указывается его место расположения, характер дефекта, скорость его развития,

степень опасности. Персонал получает возможность своевременно принимать меры к планированию ремонтных работ, либо к предотвращению аварийной ситуации. При проведении ремонта камеры нет необходимости проводить осмотр всей поверхности, работа проводится в указанных системой местах (рис. 5). Например, в 2002 г. системой КОМПАКС®-АЭ было установлено отслоение лакирующего слоя в коксовой камере № 4, в 2005 г. – ослабление опор коксовой камеры № 3.

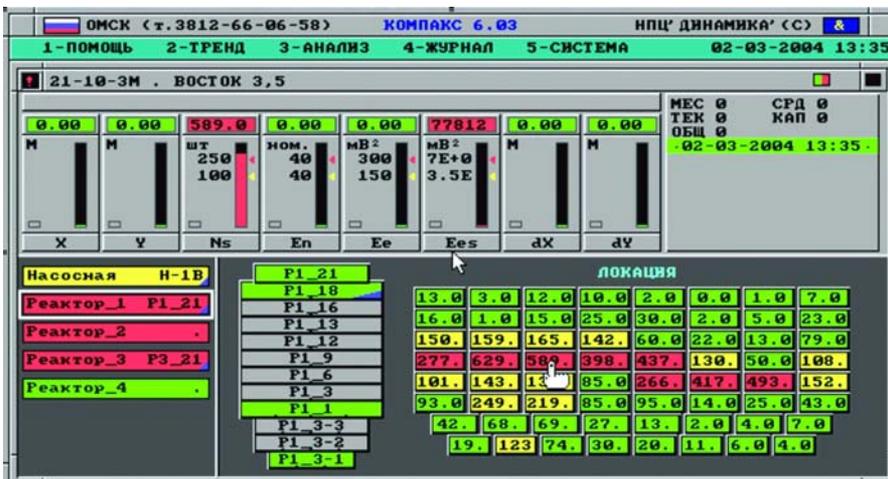


Рис. 5. Монитор диагностической станции отображает состояние коксовой камеры

В соответствии с технологией АСУ БЭР КОМПАКС®, эксплуатируемой на ОАО «Газпромнефть-Омский НПЗ», все данные о техническом состоянии оборудования, диагностируемом системами КОМПАКС®, через диагностическую сеть Compac-Net® передаются на рабочие места руководителям служб и

подразделений, отвечающих за вопросы безопасности и эксплуатации оборудования установок.

На основании показаний АСУ БЭР КОМПАКС® разработаны мероприятия, которые позволили без увеличения всего цикла работы камеры устранить влияние нежелательных факторов на ее техническое состояние, разработан новый технологический процесс. Сберегающая технология на основе мониторинга технического состояния резко снижает температурные перегрузки стенки камеры. За эти годы проведен ряд конструктивных модернизаций коксовых камер, позволивших существенно снизить накопление усталостных повреждений и облегчить температурный и напряженно-деформированный режим камер. Накопленная за один технологический цикл работы коксовой камеры величина энергетического параметра АЭ сигнала является адекватным показателем правильности ведения технологического процесса коксования (Рис. 6) – равномерные пики свидетельствуют о равномерности ведения процесса. В тоже время в отдельные периоды эксплуатации персонала установки по различным причинам не соблюдает регламент ведения технологического процесса, что отражается и на энергетическом параметре в виде большого разброса накопленной его величины (рис. 7). Поэтому данный параметр АЭ сигнала может использоваться для контроля технологической дисциплины и является мощным инструментом управления персоналом.

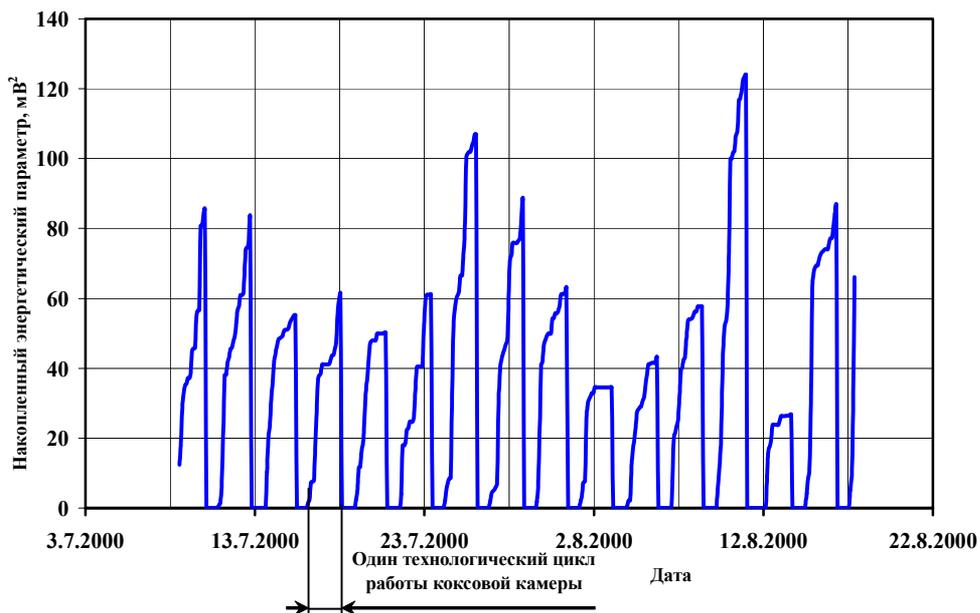


Рис. 6. Тренд накопленной за один технологический цикл работы коксовой камеры энергетического параметра АЭ при нормальном ведении технологического режима

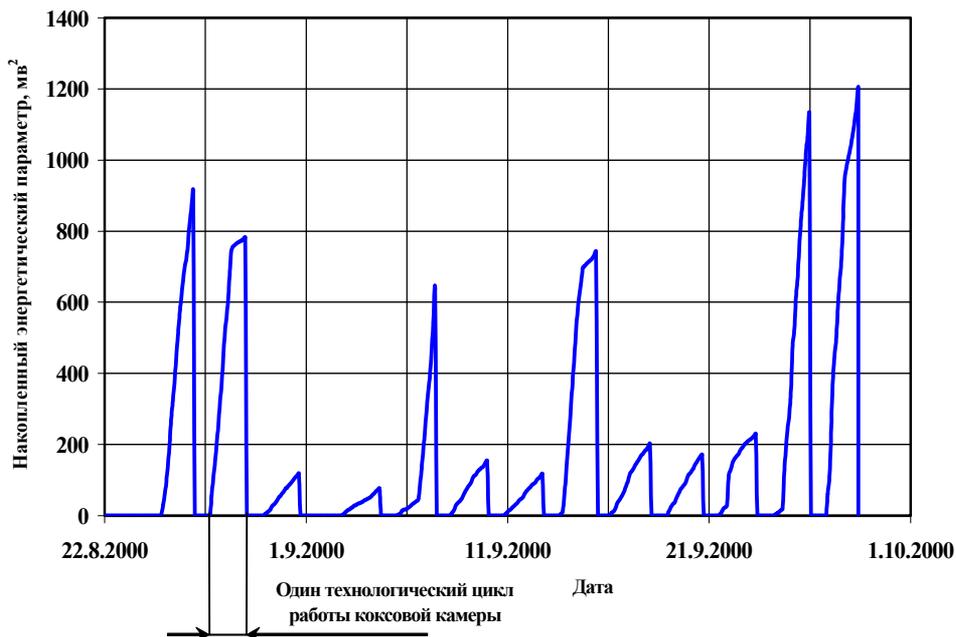


Рис. 7. Тренд накопленной за один технологический цикл работы коксовой камеры энергетического параметра АЭ при нарушениях ведения технологического режима в отдельных циклах

Одним из сложнейших объектов диагностики и мониторинга является поршневой компрессор. АСУ БЭР КОМПАКС® по почти 30 параметрам виброакустического сигнала с одного вибропреобразователя, температуры, давления определяет техническое состояние основных узлов компрессора – деталей цилиндропоршневой группы и кривошипно-ползунного механизма, клапанов, коренных подшипников и присоединенных конструкций (трубопроводов, ресиверов и т.п.), а также контролирует правильность процесса компримирования. Экран «МОНИТОР» представляет информацию о состоянии узлов поршневого

компрессора также в виде выделения зеленым, желтым и красным цветами соответствующих узлов компрессора (рис. 8). Информация об измеренных параметрах и результатах работы экспертной системы сохраняется в виде трендов (рис. 9) и сигналов.

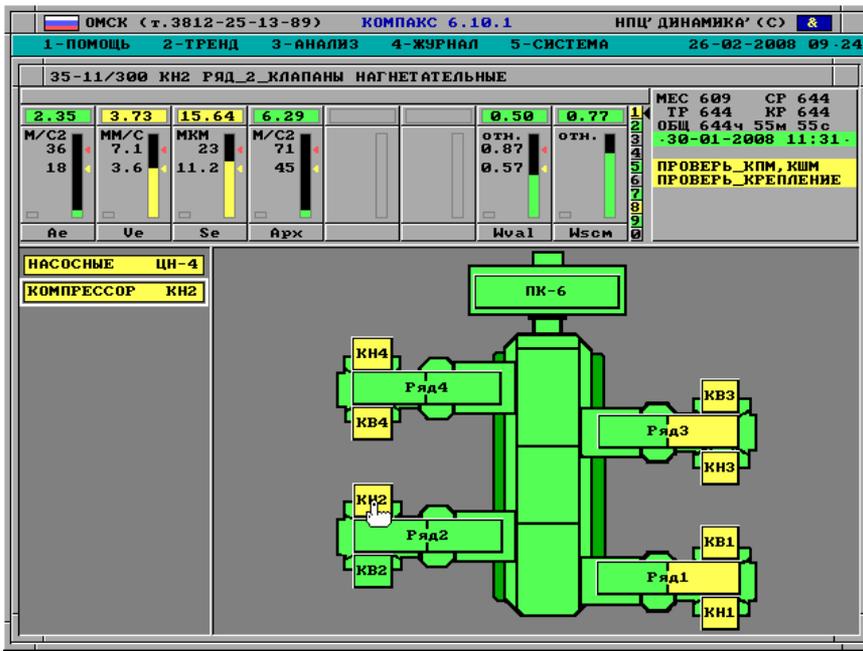


Рис. 8. Экран «МОНИТОР» системы мониторинга поршневого компрессора.



Рис. 9. Экран «ТРЕНД» диагностических признаков с выводом сообщений экспертной системы поддержки принятия решений

В период с 2000 по 2003 г. на установке 21-10/3М проведена отработка технологии эксплуатации оборудования на основе АСУ БЭР КОМПАКС®. Использование автоматической многопараметрической диагностики по виброакустическим, акустико-эмиссионным и технологическим параметрам позволило НПЦ «Динамика» создать систему комплексного мониторинга состояния оборудования нефтехимического комплекса. В конце 2003 г. в соответствии с решением Госгортехнадзора России в ОАО «Газпромнефть-Омский НПЗ» проведены межведомственные испытания системы комплексного мониторинга состояния оборудования нефтехимического комплекса АСУ БЭР КОМПАКС®

с привлечением Минэнерго России. В результате межведомственных испытаний система принята Госгортехнадзором России и рекомендовано:

- проектным организациям при выполнении проектов реконструкций и строительства использовать данные системы;
- химическим, нефтехимическим и нефтеперерабатывающим предприятиям оснащать действующие, реконструируемые и вновь вводимые мощности указанными системами.

Следующим этапом обеспечения комплексного мониторинга является контроль технического состояния оборудования 2^{ой} и 3^{ей} категорий опасности, которое нецелесообразно оснащать стационарными системами мониторинга. Как правило, интервал контроля состояния такого оборудования составляет от нескольких дней до нескольких недель и месяцев. С целью снижения затрат на обеспечение мониторинга переносные средства должны минимизировать, а в идеальном случае – исключить затраты времени на интерпретацию результатов измерений и постановку диагноза. Для реализации этой концепции НПЦ «Динамика» разработал и выпускает переносные системы автоматической диагностики динамического оборудования Compac[®]-micro. Эти системы также решают задачу по обеспечению представления результатов мониторинга в едином информационном пространстве – информация из них передается в едином формате диагностическую станцию стационарной системы КОМПАКС[®] технологической установки и на сервер сети Compac-Net[®].

Сегодня только в ОАО «Газпромнефть-Омский НПЗ» переносные системы автоматической диагностики Compac[®]-micro, обеспечивают мониторинг технического состояния более 1000 единиц машинного оборудования. Разработанная технология мониторинга динамического оборудования обеспечивает получение результатов путем проведения измерений параметров вибрации персоналом, имеющим лишь минимальные знания в области вибродиагностики, что обеспечивается, с одной стороны, возможностями по автоматической постановке диагноза программно-аппаратными средствами Compac[®]-micro и инвариантными к конструкции агрегатов алгоритмами экспертной системы поддержки принятия решений, а с другой стороны, идентификацией и конструктивным обеспечением точек измерений.

Реализация технологии АСУ БЭР КОМПАКС[®] по комплексному мониторингу оборудования ОПО сегодня осуществляется на нескольких предприятиях нефтегазохимического комплекса.

В ОАО «Газпромнефть-Омский НПЗ» находятся в эксплуатации 23 стационарных системы КОМПАКС[®], 10 переносных систем Compac[®]-micro, которые в реальном времени осуществляют мониторинг более 1700 единиц оборудования, а 10 стендовых систем КОМПАКС[®] в ремонтном производстве обеспечивают выпуск качественно отремонтированного оборудования.

В ОАО «Ачинский НПЗ ВНК» эксплуатируются 8 стационарных систем КОМПАКС[®] (КОМПАКС-КСА), две переносные системы Compac[®]-micro, которые в реальном времени

осуществляют мониторинг более 280 единиц оборудования, а 3 стендовые системы КОМПАКС® в ремонтном производстве обеспечивают выпуск качественно отремонтированного оборудования.

Экономический эффект за счет снижения эксплуатационных расходов, потерь прибыли, простоев по самым скромным подсчетам составляет не менее 10 рублей на 1 рубль затрат.

Таким образом, с внедрением АСУ БЭР КОМПАКС® на установке замедленного коксования ОАО «Газпромнефть-Омский НПЗ» впервые в мире были объединены в единый комплекс средства, обычно выполняемые в виде отдельных систем и решающие следующие задачи:

- мониторинг состояния насосно-компрессорного оборудования по параметрам вибрации, температуры, тока потребления;
- мониторинг технологических параметров (давление, температура);
- мониторинг линейного расширения коксовых камер;
- мониторинг тепловых полей коксовых камер, их градиентов, скоростей изменения;
- мониторинг состояния коксовых камер АЭ методом с обнаружением процессов трещинообразования.

Технология АСУ БЭР КОМПАКС® позволяет, путем оснащения ОПО системами комплексного мониторинга технического состояния и переносными системами автоматической диагностики, обеспечить безопасную ресурсосберегающую

эксплуатацию оборудования. Необходимый запас устойчивости технологической системы, качество ее функционирования, необходимый запас ее техногенной, экологической и экономической безопасности достигаются за счет наблюдаемости технического состояния ОПО в процессе ведения технологического режима и заблаговременной выработки управляющих воздействий.

Список литературы

1. Стандарт ассоциации «Ростехэкспертиза», ассоциации нефтехимиков и нефтепереработчиков и НПС РИСКОМ «Системы мониторинга агрегатов опасных производственных объектов» общие технические требования (СА 03-002-04). Серия 03/ Колл. авт. - М.: Химическая техника, 2005. – 42 с., согласованный Федеральной службой по экологическому, технологическому и атомному надзору РФ письмом № 11-16/219 от 1 февраля 2005 года.

2. Костюков В.Н. Мониторинг безопасности производства. М.: Машиностроение, 2002. – 224 с.

3. Костюков В.Н., Бойченко С.Н., Костюков А.В. Автоматизированные системы управления безопасной ресурсосберегающей эксплуатацией оборудования нефтеперерабатывающих и нефтехимических производств (АСУ БЭР - КОМПАКС®) / Под ред. В.Н. Костюкова. – М.: Машиностроение, 1999. – 163 с.

4. Стандарт ассоциации «Ростехэкспертиза», ассоциации нефтехимиков и нефтепереработчиков и НПС РИСКОМ «Центробежные насосные и компрессорные агрегаты опасных производств Эксплуатационные нормы вибрации» (СА 03-001-05). Серия 03/ Колл. авт. - М.: Химическая техника, 2005. – 24 с., согласованный Федеральной службой по экологическому, технологическому и атомному надзору РФ письмом № 11-16/219 от 1 февраля 2005 года.

СИСТЕМА АЭ-МОНИТОРИНГА ОПО

В.Н. Костюков, С.Н. Бойченко, А.П. Науменко, В.В. Петров, А.В.

Щелканов

(НПЦ «Динамика», г. Омск)

В последнее время одним из наиболее эффективных методов контроля технического состояния признан акустико-эмиссионный (АЭ) контроль. Его возможности при минимальных инструментальных и людских затратах позволяют не только обнаруживать и регистрировать развивающиеся дефекты, но и классифицировать их по степени опасности. Способность АЭ метода регистрировать малейшие нарушения структуры материала позволяют контролировать состояние не только испытываемых объектов, но и объектов, находящихся в эксплуатации без изменения технологического режима их работы.

Одним из основных недостатков существующих средств АЭ контроля является то, что все разработчики инструментальных средств АЭ контроля кроме набора измерительной аппаратуры и широкого набора разнообразных датчиков, несмотря на повсеместное применение компьютерной техники, не предлагают программных средств для автоматической интерпретации результатов измерений. В лучшем случае предлагаются программные продукты, которые помогают автоматизировать процесс фильтрации и кластери-

зации данных, а также для некоторых видов объектов контроля – программы для расчета карт локации.

Практически любое технологическое оборудование современных производств состоит из динамического оборудования (насосы, компрессоры, агрегаты воздушного охлаждения и т.п.) и статического оборудования (колонны, сосуды, трубопроводы и т.п.). Для диагностики и мониторинга состояния часто используют различные технические средства. Мировая тенденция к узкопрофильной специализации организаций по разработке технологий и стационарных и переносных средств диагностики конкретного типа оборудования приводит к появлению систем, которые произведены различными фирмами. Большинство из этих систем оказываются несовместимыми между собой ни по электрическим, ни по информационным параметрам, что не позволяет интегрировать их в единое информационное пространство АСУ ТП предприятия.

Принципы построения системы КОМПАКС® [1, 2] позволяют достаточно просто конфигурировать её программно-аппаратные средства, как для мониторинга состояния самого разнообразного динамического оборудования, так и для мониторинга статического оборудования.

Важнейшим фактором, определяющим надежность мониторинга, является представление и хранение результатов мониторинга в едином информационном пространстве, что обеспечивается путем стандартизации номенклатуры, формата и представления результатов мониторинга.

Примером комплексного подхода к мониторингу состояния оборудования опасного производства является система КОМПАКС® (рис. 1), обеспечивающая наблюдаемость динамического и важнейшего динамического и статического оборудования установки 21-10/3М ОАО «Газпромнефть-Омский НПЗ» и установки «Изомеризация» ОАО «Ачинский НПЗ ВНК».

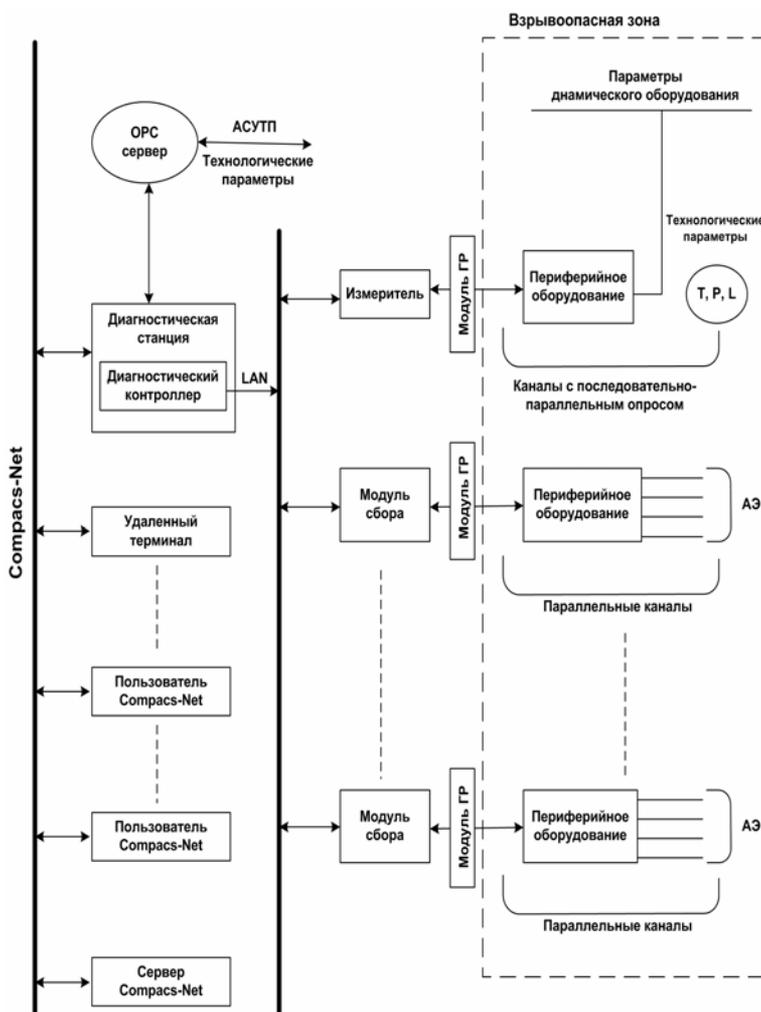


Рис. 1. Структурная схема системы КОМПАКС

Опыт АЭ контроля различных объектов с помощью многоканальных АЭ систем [3], а также опыт разработки информационно-измерительных систем [2] позволил разработать и успешно внедрить системы КОМПАКС® для АЭ мониторинга.

Особенностью структуры системы КОМПАКС® является совмещение информации о результатах измерений диагностических сигналов динамического оборудования и квазистатических сигналов технологического оборудования (температура стенок, давление, изменение линейных размеров) с данными модуля сбора и обработки АЭ сигналов. Периферийное оборудование может размещаться во взрывопожароопасных зонах, что обеспечивается соответствующим пылевлагозащищенным исполнением полевых модулей и датчиков и взрывобезопасной гальванической развязкой периферийного оборудования (модули GDU) от аппаратуры сбора и обработки данных. Немаловажным достоинством системы КОМПАКС® является возможность получения данных из технологической сети производства через OPC-сервер и передачи данных в эту сеть и в диагностическую сеть Compac-Net® пользователей данных систем КОМПАКС®.

Результаты мониторинга отображаются на мониторе с помощью цветных пиктограмм (зеленый цвет – «нормально», желтый – «требуется принятия мер», красный – «недопустимо») и диаграмм с цифровыми значениями параметров.

Для подтверждения эффективности анализа сигналов акустической эмиссии приведено сравнение трендов параметра АЭ сигнала

системы КОМПАКС[®]-АЭ (рис. 2) с трендом такого же параметра, полученного из данных АЭ обследования коксовых камер с помощью системы SPARTAN (Рис. 3). Приведенные тренды наглядно отражают идентичность получаемых данных, однако при этом необходимо учесть, что система SPARTAN при значительно большей стоимости для обеспечения непрерывного мониторинга требует непрерывного присутствия операторов достаточно высокой квалификации, в то время как система КОМПАКС[®]-АЭ работает в автоматическом режиме.

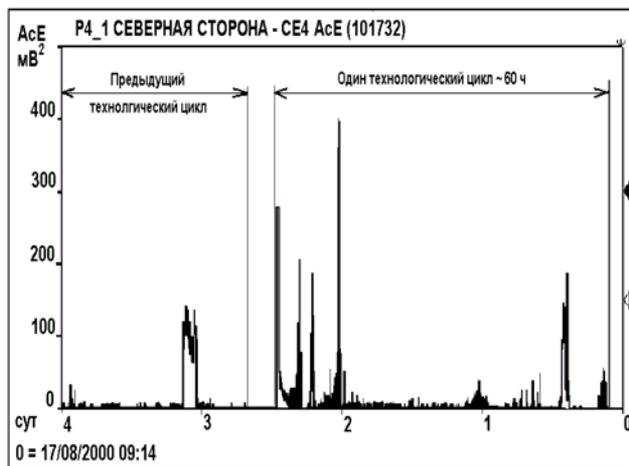


Рис. 2. Тренд энергетического параметра АЭ системы непрерывного мониторинга КОМПАКС

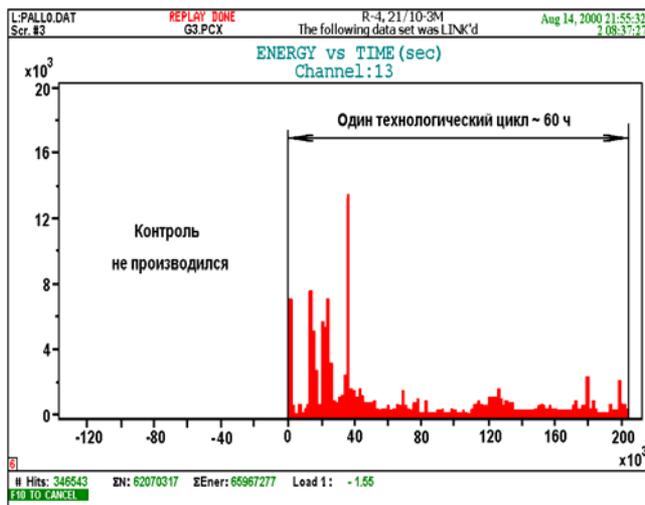


Рис. 3. Тренд энергетического параметра системы АЭ контроля SPARTAN

Система обеспечивает надежную регистрацию сигналов в условиях высокого уровня промышленных помех, позволяет интегрально оценивать состояние объектов, обеспечивает локализацию источников акустической эмиссии - областей возникновения и/или роста дефектов. Встроенная система автокалибровки обеспечивает проверку работоспособности каналов системы, проверку правильности установки датчиков и настройки системы локации.

Программное обеспечение системы включает в себя модуль измерения и вычисления первичных параметров, вычислительно-диагностический модуль анализа полученных данных (экспертная система), модули отображения информации на экране диагностической станции, речевого вывода, анализатора сигналов с автоматическим формированием спектральной матрицы, журнала механика-электрика, печати протоколов, модуля связи по коммутируемым

каналам Ethernet по протоколу TCP/IP.

Экспертная система проводит анализ информации о текущих значениях признаков, их временных трендах и спектральных характеристиках сигналов и автоматически интерпретирует результаты анализа в термины технического состояния оборудования.

Сетевые возможности системы обеспечиваются встроенной поддержкой коммутируемых (телефонных) сетей, использующих модемы для передачи данных, и сетевых протоколов. Имеется возможность публикации данных на встроенном Web-сервере, что обеспечивает доступ к данным системы любых пользователей, оснащенных стандартным программным обеспечением для работы в Интернет.

Непрерывный АЭ мониторинг позволил зафиксировать возникновение одной из обычных проблем коксовых камер – отслоение лакирующего слоя корпуса камеры, что обычно обнаруживаются в период ремонтов. Несвоевременное восстановление лакирующего слоя во время эксплуатации весьма сильно термонагружает корпус камеры.

Мониторинг параметров АЭ сигналов реакторного блока предварительной гидроочистки установки «Изомеризация» позволяет фиксировать опасную нагруженность материала блока вследствие изменения давления внутри реактора (рис. 4, 5) и предупреждать персонал о необходимости изменения технологического режима.

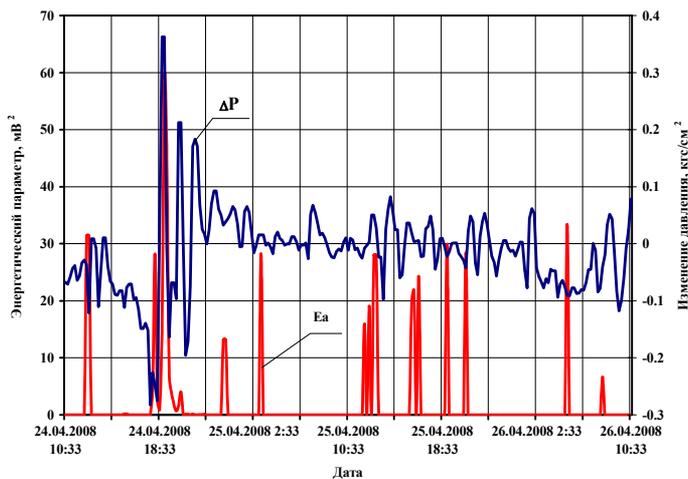


Рис. 4. Тренды изменения давления внутри реактора и энергетического параметра АЭ сигнала

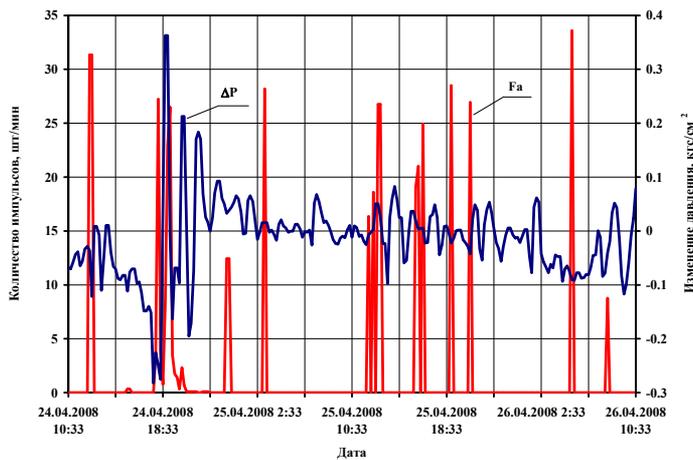


Рис. 5. Тренды изменения давления внутри реактора и интенсивности АЭ импульсов

Анализ затрат на внедрение и эксплуатацию системы КОМПАКС[®]-АЭ на четырех коксовых камерах показывает, что при двухгодичном цикле эксплуатации между капитальными ремонта-

ми и нормированном простое за это время длительностью 64 суток при сокращении времени простоя на ремонте наполовину за счет проведения целенаправленных ремонтов и эксплуатации по фактическому техническому состоянию ежегодно можно получать дополнительно продукцию на сумму до 1,2 млн. долларов. При этом внедрение системы КОМПАКС®-АЭ окупится при сокращении времени простоя установки на ремонт всего лишь за три дня.

Таким образом, внедрение системы комплексного мониторинга КОМПАКС® на опасных производствах позволяет не только значительно повысить безопасную эксплуатацию оборудования, но и за счет мониторинга состояния динамического оборудования (насосы, электродвигатели, компрессоры и др.) и статического оборудования (резервуары, реакторы, трубопроводы и др.) перейти на эксплуатацию оборудования по фактическому техническому состоянию, что приводит к значительной капитализации производства. Подобный положительный опыт нашел свое отражение в разрешении Ростехнадзора на переход на эксплуатацию по фактическому техническому состоянию комплекса «Ароматика» в ОАО «Газпромнефть-Омский НПЗ».

Список литературы

1. Костюков В.Н. Мониторинг безопасности производства. М.: Машиностроение, 2002. – 224 с.
2. Костюков В.Н., Бойченко С.Н., Костюков А.В. Автоматизированные системы управления безопасной ресурсосберегающей эксплуатацией оборудования нефтеперерабатывающих и нефтехимических производств (АСУ БЭР - КОМПАКС®) / Под ред. В.Н. Костюкова. – М.: Машиностроение, 1999. – 163 с.

3. Диагностирование криогенных резервуаров с термоизоляционным кожухом // В.Н. Костюков, А.П. Науменко, В.А. Чикарин, М.Г. Шакирзянов / Химическая техника. – № 5. - 2006. – С. 6-9

ОСОБЕННОСТИ СПЕКТРОВ АКУСТИЧЕСКОЙ ЭМИССИИ ПРИ РАЗРУШЕНИИ ТВЕРДЫХ ТЕЛ

В.А. Крылов
(Ростехнадзор)

Особенности спектров акустической эмиссии при разрушении твердых тел в полной мере могут быть объяснены на стыке квантовой и классической теории. Особенность этой гибридной задачи состоит в том, что она должна учитывать поведение материала в окрестности, по крайней мере, двух критических точек: 1 – точки сингулярности, связанной с вершиной макротрещины, и 2 – точки фазового перехода II рода. Окрестность первой критической точки условно назовем экстремальным пограничным слоем, второй – областью флуктуаций параметра порядка. Каждая из окрестностей описывается своим потенциалом: экстремальный пограничный слой – потенциалом ускорений [1], окрестность флуктуаций параметра порядка – термодинамическим потенциалом [2]. Считаем, что обе эти области имеют дробную (фрактальную) размерность и удовлетворяет условиям открытости и диссипативности.

Фрактальная размерность является основным параметром теории, поскольку она входит в формулу для расчета вероятности разрушения материала в виде параметра формы распределения Вейбулла [3]. Цель акустико-эмиссионной спектроскопии состоит в определении изменения фрактальной размерности в процессе

разрушения материала. Данная работа посвящена установлению аналитической зависимости спектральных характеристик акустической эмиссии и фрактальной размерности.

Решение этой задачи может быть получено при микроскопическом подходе. С помощью разложения потенциала ускорений в окрестности точки сингулярности в ряд Лорана можно получить уравнение Шрёдингера для квантового осциллятора-фрактана, помещенного в точку сингулярности и обладающего фрактальной массой. Решение этого уравнения в приближении ВКБ позволяет получить аналитическое выражение для n -го уровня энергии фрактана. Особенность полученного решения состоит в том, что уровни энергии испытывают расщепление, причем величина относительного расщепления критического уровня в точности равна фрактальной размерности окрестности точки сингулярности. Этот эффект, по-видимому, родственен эффекту Яна-Теллера [4] и обусловлен зависимостью плотности фрактана от фрактальной размерности.

Таким образом, измеряя каким-либо спектроскопическим способом величину расщепления энергетических уровней фрактана, мы в принципе можем измерить фрактальную размерность и, следовательно, определить вероятность разрушения по формуле Вейбулла. В подтверждение этому, из анализа выражения для волновой функции фрактана следует, что для определенных значений параметров среды ее квадрат совпадает с распределением Вейбулла, т.е. выполняется условие эргодичности.

Однако полученное решение не учитывает хорошо известное в

квантовой физике явление декогеренции [5], обусловленное влиянием на микрообъект окружающей среды и приводящее к «зашумлению» эффекта расщепления. Для того чтобы величина отношения «сигнал-шум» в такой системе была достаточной для спектроскопических измерений, необходимо, чтобы окружающая среда обладала хорошими резонансными свойствами относительно выделенной степени свободы (независимой координаты), т.е. чтобы добротность ее была много больше единицы. Можно показать, что этому свойству удовлетворяет окрестность второй критической точки – температуры фазового перехода II рода, если в качестве независимой координаты выбран параметр порядка. Добротность окрестности точки фазового перехода определяется величиной ее «потерь на звук», т.е. интенсивностью акустической эмиссии. Добротность такого «резонатора» обращается в бесконечность, когда потери на звук равны нулю. Это достигается при определенной температуре T_0 , в общем случае не совпадающей с температурой фазового перехода. При этом энергетический спектр фрактона начинает эффективно взаимодействовать с флуктуациями параметра порядка, обмениваясь с ними энергией. Возникают так называемые осцилляции Раби (осцилляции внутренней энергии фрактона) [6]. Частота этих осцилляций зависит от степени взаимодействия, а относительная величина уширения резонансной частоты осцилляций – от фрактальной размерности. Не смотря на то, что акустическая эмиссия из области предразрушения, формируемой у вершины макротрещины, при этом будет отсутствовать, осцилляции Раби, в принципе, можно наблюдать по

методу рассеяния рентгеновского или нейтронного излучения на флуктуациях параметра порядка в твердых телах с дефектами. Такого рода спектроскопические измерения были проведены, и они подтвердили аномальный рост спектральных пиков флуктуаций параметра порядка по мере накопления дефектов [4]. Однако, справедливости ради, следует отметить, что до настоящего времени строгого теоретического объяснения этого эффекта не дано (проблема центрального пика).

Существенная особенность такого резонатора, настроенного на определенную моду флуктуаций параметра порядка, состоит в том, что бесконечная добротность в нем достигается не при нулевой, а при вполне определенной эффективной температуре $T_0 \gg 1$ К, зависящей от критических параметров разрушения: в частности, от критической длины микротрещины и критического механического напряжения. Такова специфика задачи, связанной с разрушением. При этом между критическими параметрами должно выполняться условие гиперболической калибровочной симметрии, т.е. их произведение должно быть равно константе.

Очевидно, что на практике добротность в окрестности точки фазового перехода II рода не может быть бесконечно большой, поэтому неизбежно возникают потери на звук, и тогда осцилляции Раби можно наблюдать по методу акустико-эмиссионной спектроскопии. Это достигается, когда нарушается условие гиперболической калибровочной симметрии, и эффективная температура области флуктуаций параметра порядка становится больше температуры T_0 из-за условия ренормировки.

Таким образом, задача сводится к учету взаимодействия фрактона с флуктуациями параметра порядка, а возможность измерения состояния фрактона по спектру акустической эмиссии появляется из-за потерь системы на звук.

Аналитическое выражение для флуктуаций параметра порядка может быть получено из динамического уравнения Ландау – Гинзбурга, основанного на разложении термодинамического потенциала по параметру порядка. В марковском приближении функция распределения флуктуаций при выполнении определенных нормировочных преобразований совпадает с функцией распределения Вейбулла [7]. Это указывает на равновесный характер взаимодействия фрактона с флуктуациями параметра порядка.

В области больших масштабов динамическое уравнение Ландау – Гинзбурга для флуктуаций параметра порядка сводится к уравнению Шрёдингера для системы взаимодействующих микрочастиц. Распределение Вейбулла при этом вырождается в распределение Ферми-Дирака. Параметром, контролирующим вырождение, является фрактальная размерность. Энергия Ферми в таком распределении в точности соответствует энергии разрушения, а нулевая температура – температуре T_0 .

В таком случае, задача сводится к задаче о взаимодействии пробной квантовой частицы (фрактона) при движении ее в среде, состоящей из большого числа точечных частиц, взаимодействующих друг с другом и подчиняющихся статистике Ферми-Дирака. Ансамбль этих частиц и образует резервуар,

приводящий к диссипации и декогеренции фрактона. В результате взаимодействия фрактона с резервуаром состояние последнего изменяется, что, по сути дела, и приводит к записи в резервуаре информации о состоянии фрактона. На языке квантовой физики происходит запутывание (entanglement) состояний фрактона и резервуара. Уравнение для матрицы плотности такой системы имеет вид уравнения Линдблада [8]

$$d\rho/dt = -i/\hbar[H, \rho] - 1/2\kappa[\mathbf{r}[\mathbf{r}, \rho]],$$

где константа κ , учитывающая силу взаимодействия, зависит от эффективной температуры T_0 и коэффициента трения η ; радиус вектор \mathbf{r} играет роль измеряемой координаты.

Признаком декогеренции является исчезновение недиагональных элементов матрицы плотности ρ . Окружающая среда действует при этом как гребенчатый фильтр, подавляющий квантовые шумы, обусловленные суперпозицией волновых функций; диагональные элементы при этом играют роль главных компонент, которые и определяют спектральные свойства измеряемой системы.

Взаимодействие с резервуаром приводит к возмущению гамильтониана фрактона $H = H_0 + V$, где H_0 – свободный гамильтониан фрактона, а V – возмущение, которое определяется своими матричными элементами

$$\langle \varphi_1 | V | \varphi_2 \rangle = V_0.$$

Считаем, что матричные элементы оператора V являются гармоническими функциями частоты рабочего перехода $\omega = \delta E/\hbar$,

где величина расщепления энергетических уровней $\Delta E \sim D -$ фрактальной размерности. Тогда потенциал возмущения V будет описывать резонансное воздействие. Система уравнений для коэффициентов разложения вектора состояния по базису

$$|\varphi_n(t)\rangle = \exp(-iE_n t/\hbar)|n\rangle, \quad n = 1, 2$$

будет иметь вид

$$dC_1/dt = -i\nu C_2 - \kappa|E_1 - E(t)|C_1,$$

$$dC_2/dt = -i\nu C_1 - \kappa|E_2 - E(t)|C_2,$$

где $\nu = V_0/\hbar$ – частота осцилляций Раби; $E(t)$ – функция, описывающая результат измерения.

Если добротность системы равна бесконечности ($\kappa = 0$), акустическая эмиссия отсутствует, то эта система описывает осцилляции Раби в чистом виде

$$R_1(t) = C_1(t) = C_1(0)\cos \nu t - iC_2(0)\sin \nu t,$$

$$R_2(t) = C_2(t) = C_2(0)\cos \nu t - iC_1(0)\sin \nu t.$$

При конечной добротности спектр акустической эмиссии зависит от соотношения трех временных параметров: длительности импульса акустической эмиссии τ_a , времени разрешения уровней τ_r и периода осцилляций Раби $\tau_R = \pi/\nu$.

Наиболее интересен режим, при котором $\tau_R \sim \tau_r \sim \tau_a$. При этом энергия флуктуаций параметра порядка колеблется между уровнями E_1 и E_2 ; колебания энергии соответствуют осцилляциям Раби. Поведение спектра акустической эмиссии должно описываться функцией [8]

$$P(t) = |C_2(t)|^2 / (|C_1(t)|^2 + |C_2(t)|^2),$$

характер изменения которой во времени зависит от функции, описывающей результат измерения. В нашем случае $E_2 = (D + 1)E_1$. Предположим, что $E(t) = E_1$, тогда система уравнений примет вид

$$\begin{aligned}dC_1/dt &= -i\nu C_2, \\dC_2/dt &= -i\nu C_1 - \kappa DE_1 C_2.\end{aligned}$$

Продифференцируем обе части второго уравнения системы по времени, получим

$$d^2C_2/dt^2 + \kappa DE_1 dC_2/dt + \nu^2 C_2 = 0.$$

Это уравнение описывает линейный гармонический осциллятор с трением, колеблющийся с частотой Раби ν . Коэффициент трения равен

$$\eta = \kappa DE_1/2,$$

откуда получаем выражение для коэффициента κ

$$\kappa = 2\eta/DE_1.$$

Как следует из теории, коэффициент κ по своему физическому смыслу определяет погрешность измерения состояния фрактонa

$$\kappa = 1/T\Delta E_T,$$

где ΔE_T – погрешность (среднеквадратичное отклонение) непрерывного измерения энергии, длящегося в течение времени T .

Откуда следует соотношение между длительностью импульса акустической эмиссии $T = \tau_a$, среднеквадратичным отклонением измерения энергии фрактонa, эффективным коэффициентом трения окружающей среды и фрактальной размерностью

$$\tau_a \Delta E_T = DE_1/2\eta.$$

Из этой формулы мы можем получить формулу для длительности импульса акустической эмиссии

$$\tau_a = DQ/2\eta,$$

где $Q = E_1/\Delta E_T$ – добротность резонатора.

Коэффициент трения можно выразить из уравнения Линдблада

$$\eta = \lambda\omega/2,$$

где λ - некоторая константа взаимодействия, тогда формула для длительности импульса акустической эмиссии переписется в виде

$$\tau_a = DQ/\lambda\omega.$$

При $\lambda = 2\pi D$ – эта формула совпадает с формулой для времени запираания фотона во фрактонном кристалле.

Поскольку величина коэффициента трения η определяет полуширину спектральной линии акустической эмиссии, то отсюда следует, что в таком случае полуширина пропорциональна величине фрактальной размерности

$$\eta = \pi D\omega,$$

что и требовалось доказать.

На основании полученных формул следует вывод о том, что акустико-эмиссионная спектроскопия имеет смысл при условии, что частота перехода фрактона $\omega \ll \nu$ – частоты осцилляций Раби. Можно показать, что этому требованию должно удовлетворять выполнение условия гиперболической калибровочной симметрии критических параметров разрушения в окрестности точки фазового перехода II рода.

Список литературы

1. Панченков А.Н. Энтропия 2. Хаотическая механика. Н. Новгород, 2002. 712 с.
2. Лифшиц Е.М., Питаевский Л.П. Физическая кинетика. М.: Наука, 1979. 527 с.
3. Иванова В.С. Синергетика. Прочность и разрушение металлических материалов. М.: Наука, 1992. 159 с.
4. Рассеяние света вблизи точек фазовых переходов. Под ред. Камминза Г.З., Леванюка А.П. М.: Наука, 1990. 413 с.
5. Менский М.Б. Диссипация и декогеренция квантовых систем. УФН, том 173, №11, 2003, стр. 1199 – 1219.
6. Коньков Л.Е., Пранц С.В. Хаотические вакуумные осцилляции Раби в резонансной квантовой электродинамике. Письма в ЖЭТФ, том 65, вып. 11, 1997, стр. 801-806.
7. Крылов В.А. Определение вероятности саморазрушения металла по спектру акустической эмиссии на стадии предразрушения. Атомная энергия, том 102, вып. 6, 2007, стр. 351 – 357.
8. Менский М.Б. Явление декогеренции и теория непрерывных квантовых измерений. УФН, том 168, № 9, 1998, стр. 1017 – 1034.

АКУСТИКО-ЭМИССИОННАЯ ДЕФЕКТОСКОПИЯ ЗАВОДСКИХ ГРУЗОПОДЪЕМНЫХ МЕХАНИЗМОВ

*А.Н. Кузьмин, А.В. Жуков, Д.Б. Журавлев, С.Ю. Филиппов
(ООО «ИНТЕРЮНИС» филиал «Интерюнис-Урал»,
г. Екатеринбург)*

Введение

Известно, что с течением времени риск внезапного отказа оборудования после длительной его эксплуатации существенно возрастает. К числу основных факторов разрушения можно отнести накопление повреждений в локальных зонах концентрации пластических деформаций, что может приводить к локальному интенсивному образованию трещиноподобных дефектов. Причинами таких дефектов являются интенсивные пластические деформации, развивающиеся в зонах перенапряжений из-за многоцикловых эксплуатационных статических нагрузок. Таким образом, в процессе эксплуатации более вероятны местные или локализованные повреждения, а не повальное ухудшение свойств материала по всей металлоконструкции. Это в полной мере касается металлоконструкций грузоподъемных механизмов (ГПМ). При этом опыт диагностирования ГПМ показывает, что традиционно применяемых сегодня методов неразрушающего

контроля явно недостаточно для достоверной и полной оценки их технического состояния.

Изменение материала в зонах концентраций напряжений наиболее надежно контролируется методом АЭ [1]. Опасность дефекта при этом характеризуется не его размером, а скоростью накопления повреждений. Поэтому задачи технического диагностирования ГПМ – поиск дефектов и прогнозирование времени сохранения работоспособного состояния, т.е. оценка остаточного ресурса, – решаются совместно. На основе конкретных практических результатов, показано, что основной метод, который может быть положен в основу их решения, является метод акустической эмиссии. В статье представлен опыт проведенного специалистами компании ООО «ИНТЕРЮНИС» технического диагностирования промышленных подъемных механизмов: козлового и мостового кранов с применением акустико-эмиссионного метода контроля.

АЭ контроль ГПМ осуществлялся в соответствии с требованиями действующих ПБ 03-593-03 [2], т.е. конструкция ступенчато нагружалась подъемом груза до уровня, превышающем на 15% допустимую рабочую нагрузку. Целью проведения АЭ контроля являлось выявление на начальном этапе развивающихся и склонных к развитию дефектов, проявляющихся в процессе изменения нагрузки, определение их местоположения и оценка их опасности. Для проведения АЭ контроля использовалась цифровая АЭ система A-Line 32D производства компании «ИНТЕРЮНИС» с преобразователями акустической эмиссии (ПАЭ) типа GT-200.

ПАЭ устанавливались на зачищенную до металлического блеска поверхность объекта контроля через контактную смазку и крепились магнитными держателями.

АЭ-контроль конструкций подъёмного механизма козлового типа

Повреждения при эксплуатации козлового крана типа ККС-10 чаще всего возникают в металлоконструкциях ферм 4-х вертикальных опор (рис. 1), каждая из которых состоит из двух ферм, крепящихся друг другу посредством болтовых соединений. Соответствующие схемы расстановки преобразователей акустической эмиссии (ПАЭ) показаны на рисунке 2. Схемы локации источников АЭ выбиралась из необходимости минимизации влияния ложных сигналов, возникающих на узловых соединениях опор. В ходе диагностирования обеспечивался 100% АЭ контроль основного металла и сварных соединений конструкции. Для увеличения достоверности результатов акустической эмиссии использовались комбинированные схемы локации. Значительным фактором, снижающим эффективность АЭ контроля, являются шумы. С целью минимизации помех АЭ диагностика проводилась на неподвижном кране вдали от источников механических шумов. Для повышения соотношения сигнал шум и выделения полезного сигнала применялись различные аппаратные методы устранения помех, реализованные в системе A-Line, к которым в частности относятся: узкополосная фильтрация входного сигнала, метод когерентных замеров, а также

аппаратурные методы фильтрации в режиме постобработки. Оценка зарегистрированных источников АЭ проводилась по критериям, изложенным в [2], в соответствии с которыми зарегистрированные источники АЭ разделяли на 4 класса опасности.



Рис. 1. Вертикальные опоры крана ККС-10 грузоподъемностью 10 тонн

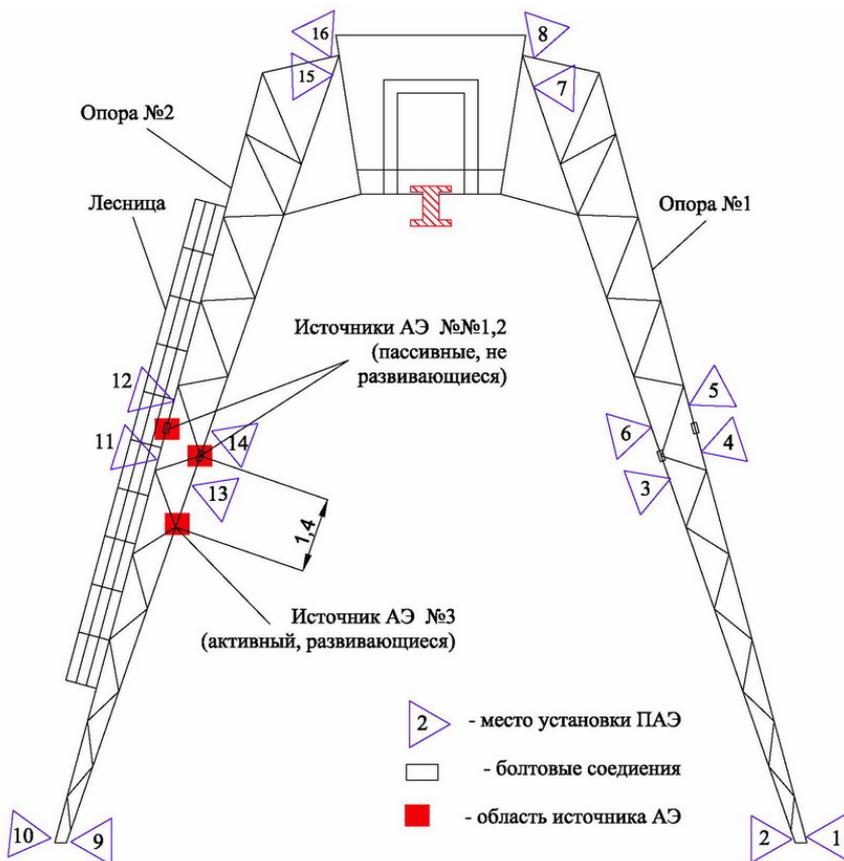


Рис. 2. Схема расстановки датчиков и расположения областей источников АЭ при проведении диагностики методом акустической эмиссии 1 и 2 опор козлового крана ККС-10

По результатам проведения АЭ контроля металлоконструкции вертикальных опор козлового крана обнаружены источники АЭ 1-го и 2-го класса опасности, соответствующие неразвивающимся и развивающимся дефектам (рис. 2). Пассивные, неразвивающиеся источники АЭ первого класса опасности были обнаружены в областях болтовых соединений несущих ферм опор. Дальнейший

анализ частотного спектра сигнала АЭ от данных источников показал неоднородный широкополосный характер спектра в регистрируемой рабочей полосе частот со смещением максимума в низкочастотную область. Это позволило сделать предположение о помеховом характере регистрируемого АЭ сигнала. При проверке неразрушающими методами контроля мест расположения пассивных источников АЭ 1-го класса опасности других дефектов (кроме незатянутых болтовых соединений) в основном металле и прилегающих сварных соединениях обнаружено не было. Этот факт подтвердила последующая протяжка болтовых соединений в местах обнаруженных источников АЭ 1-го класса, после которой источники АЭ были устранены. Таким образом, применение метода АЭ позволяет качественно оценить состояние болтовых соединений несущих элементов козлового крана, а также в случае наличия незатянутых болтовых соединений точно определить местоположение по локационной картине.



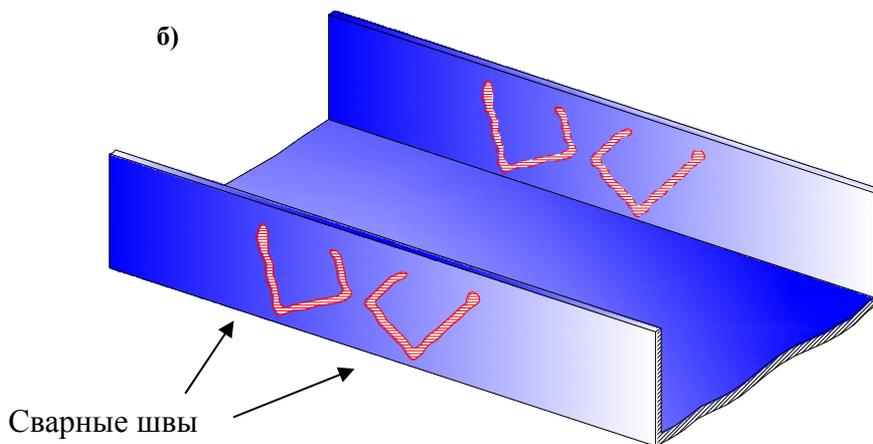


Рис. 3. Область расположения источника АЭ 2-го класса опасности на сварных соединениях приварки раскосов (а), соответствующая схема проведения проверочного магнитометрического контроля (б).

Источник АЭ 2-го класса опасности был обнаружен по характерной локационной диаграмме в одном из мест приварки раскосов к боковой ферме опоры. Частотные параметры источника АЭ соответствовали трещиноподобному дефекту со смещением максимума спектра в высокочастотную область. На рисунке 3 а представлен фрагмент опоры с обнаруженным источником АЭ 2-го класса опасности. Дополнительный дефектоскопический контроль (ДДК) основного металла и прилегающих сварных соединений на предмет выявления недопустимых дефектов в месте обнаруженного источника АЭ проводился с применением визуально-измерительного контроля, ультразвукового контроля, контроля проникающими веществами и магнитометрического контроля (рис. 3 б). По результатам ВИК из обнаруженных дефектов следует

выделить только изгиб бокового раскоса металлоконструкции, что хорошо видно на рисунке 3 а. При проведении магнитометрического контроля сварных соединений методом магнитной памяти металла в области расположения источника АЭ обнаружены зоны нескомпенсированных механических напряжений. Последние чаще всего являются причиной зарождения и развития опасных трещиноподобных дефектов, которые обычными физическими методами контроля (ВИК, УЗК, КПВ) могут быть не выявлены. Такой результат позволил специалистам сделать вывод о зарождающемся характере разрушения и необходимости последующего ремонта сварных соединений в области выявленного источника АЭ 2-го класса опасности.

Диагностирование мостового подъёмного крана

Схема расстановки ПАЭ на металлоконструкции мостового крана показана на рисунке 4. Особенностью схемы является расположение ПАЭ в наиболее опасных местах с точки зрения развития усталостных разрушений: сварные соединения главных и концевых балок, а также буксовые узлы концевых балок. При этом с применением линейной схемы локации контролируется 100% металлоконструкций главных и концевых балок крана. Измерения акустико-эмиссионного сигнала проводились в низкочастотном диапазоне полосы частот фильтра. Выбор полосы частот был установлен экспериментально и обусловлен необходимостью устойчивой регистрации источников АЭ вдали от приёмного

преобразователя. Нагружение объекта контроля проводилось в рабочих условиях в пределах 10-18.75 т. в соответствии с [2].

В результате проведения АЭ диагностики в области сварного соединения главной балки №1 и концевой балки №2, а также в областях буксовых узлов обнаружены источники акустической эмиссии второго класса опасности, соответствующие развивающимся дефектам (рис. 4).

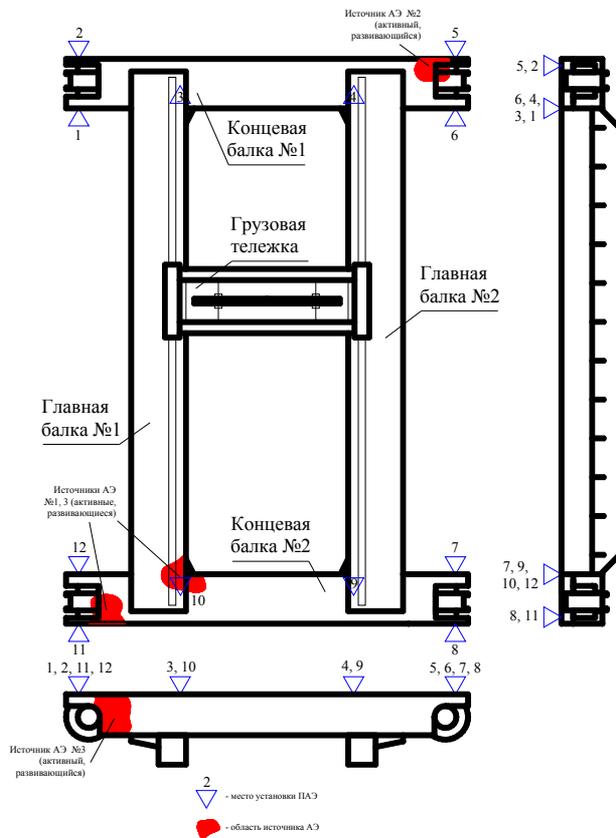


Рис. 4. Схема расстановки ПАЭ и расположения областей источников АЭ при проведении диагностики методом акустической эмиссии металлоконструкций крана мостового электрического г/п 10 тонн.

В местах расположения источников АЭ для идентификации дефектов был проведен дополнительный дефектоскопический контроль методами ВиК, УЗК, ПВК и магнитометрии. При дополнительном дефектоскопическом контроле в месте обнаруженного источника АЭ №1 обнаружен незаваренный участок протяженностью 40 мм (отсутствует сварной шов, рис. 5). В зоне непровара обнаружен концентратор напряжения, который послужил причиной образования источника АЭ, соответствующего развивающемуся дефекту усталостного характера.



*Рис. 5. Дефект №1 в области соединения главной балки №1
и концевой балки №2*

В месте расположения источника АЭ №2 обнаружена трещина с выходом на поверхность протяженностью 130 мм (рис. 6).



*Рис. 6. Трещина и её фрагменты по КПВ в области буксового узла,
источник АЭ №2*

Важно отметить, что дефекты на источниках АЭ №1 и №2 при проведении дополнительного контроля, являются недопустимыми и, вероятно, были пропущены при проведении экспертизы промышленной безопасности. Что касается выявленного источника АЭ №3 (рис. 4), то особый интерес представляет тот факт, что в месте его обнаружения локальное обследование методами ВИК и УЗК результатов не дали. Однако с целью оценки и подтверждения степени опасности источника АЭ №3 был применен метод магнитной памяти металла [4].



Рис. 7. Область расположения источника АЭ №3 с нанесенной сеткой для определения собственных магнитных полей рассеяния методом ММП

На рисунке 7 показан пример схемы сканирования магнитных полей рассеяния в месте расположения источника АЭ №3. При этом были обнаружены явные аномалии магнитного поля в области сварного соединения буксового узла – месте расположения источника АЭ №3. Это также дало основание предположить наличие в указанной области нескомпенсированных механических напряжений, обуславливающих зарождение дефекта, которое традиционными методами контроля обнаружить крайне затруднительно. Сложность или невозможность локального контроля в таких местах ГПМ объясняется многими факторами, но, как правило, связана с ограниченными возможностями применяемых традиционных методов контроля. Поэтому было принято решение с целью отслеживания динамики развития

данного дефекта провести повторный АЭ контроль через 1 год. На основании представленных результатов следует подчеркнуть, что регламентное проведение контроля ГПМ явно недостаточно для достоверной и полной оценки технического состояния объекта, особенно при определении его остаточного ресурса.

Выводы

1. На конкретных примерах ГПМ показана принципиальная возможность обнаружения с помощью метода АЭ опасных внутренних зарождающихся и развивающихся дефектов, выявление которых обычными методами контроля не представляется возможным.
2. Результаты приведенного диагностирования ГПМ с применением метода АЭ позволяют достоверно оценить техническое состояние объекта с целью принятия решения о возможности его дальнейшей эксплуатации.

Список литературы

1. Грешников В.А., Дробот Ю.Б. Акустическая эмиссия. М.: Изд. Стандартов, 1976, -272 с.
2. ПБ-03-593-03 Правила организации и проведения акустико-эмиссионного контроля сосудов, аппаратов, котлов и технологических трубопроводов. СПб.: Издательство ДЕАН, 2004. 64с.
3. Комплекс информационно-вычислительный дефектоскопический акустико-эмиссионный A-Line32D. Руководство пользователя. – М.: Интерюнис, 2000. – 18 с.
4. Дубов А.А. и др. Метод магнитной памяти металла и приборы контроля. М.: Изд-во «Тиссо», 2006, - 2 т.

ПРОЧНОСТНОЙ ПОДХОД ПРИ РАЗРАБОТКЕ КРИТЕРИЕВ АЭ ПРИ ПРОВЕДЕНИИ АЭ КОНТРОЛЯ В УСЛОВИЯХ СТАТИЧЕСКОГО НАГРУЖЕНИЯ

*В.А. Миргазов, Н.И. Кончаков, А.Г. Андреев
(ЗАО "НПП "Криосервис", МО, г. Балашиха)*

На основе ГОСТ 14249-89 предложен(а) алгоритм (методика) разработки критериев Акустико эмиссионного контроля при статическом нагружении конструкций. Предложен вариант нагружения образца свидетеля непосредственно на контролируемом изделии с последующей регистрацией сигналов АЭ и с одновременной корреляцией уровней напряжений. Образец – свидетель изготавливается из того же материала что и контролируемая конструкция и при нагружении имеется возможность регулировать скорость нагружения.

В химическом, нефтяном и криогенном машиностроении большинство нормативных документов по расчету на прочность содержат методики, основанные на расчете по предельным нагрузкам. Все элементы сосудов и аппаратов должны удовлетворять условию прочности: максимальные величины напряжений в условиях эксплуатации (расчетное давление) и испытаний (пробное давление) не должны быть больше соответствующих допускаемых напряжений.

Расчет конструкции на прочность производится по допускаемым напряжениям $[\sigma]$, определяемым из условий прочности при статическом нагружении.

При статическом нагружении допускаемые напряжения $[\sigma]$ задаются исходя из предельных значений для данного материала напряжения σ , деленного на коэффициент безопасности, иначе называемый коэффициентом запаса прочности - n .

Для пластичных материалов за предельное напряжение принимают предел текучести, для квазихрупких – временное сопротивление:

$$[\sigma] = \sigma_{0,2} / n_T, \quad \text{или} \quad [\sigma] = \sigma_B / n_B.$$

Значение коэффициента запаса зависит от многих факторов: разброса характеристик прочности, наличия допускаемых техническими условиями дефектов в материале, степени схематизации расчетных схем и др. По данным отечественной практики, в соответствии с ГОСТ 14249 рекомендуется в случае использования материалов с опытом эксплуатации принимать: $n_T = 1,5$ и $n_B = 2,4$ (или более при неизвестных параметрах эксплуатации и др.).

Наличие в конструкциях дефектов отражается на напряженном состоянии конструкции. Какие-то дефекты, например, некоторые из дефектов формы, могут приводить к образованию в конструкции зон, изменение напряженного состояния в которых свойственно зонам краевого эффекта. Другие дефекты (таких обычно больше) является зонами концентраций напряжений. Уровень напряжений в зонах концентрации напряжений может быть значительно выше,

чем в зонах краевого эффекта. Концентрацию напряжений могут создавать, например, локальное утонение стенки, трещины, какое-то инородное включение в структуру материала, поверхностные повреждения стенки и др. Дефект может быть обнаружен методом АЭ, если он развивается - что происходит при повышении уровня напряжений в конструкции под нагрузкой или каком-то другом воздействии (например, коррозии).

Показательным примером является трубопровод низкого давления $p=0,6$ МПа, температура которого при пуске в эксплуатацию изменяется от $+20^{\circ}\text{C}$ до минус 196°C . Очевидно, напряжения в такой трубе от рабочего давления будут очень незначительными, а напряжения самокомпенсации трубопровода, могут значительно превосходить напряжения от давления. При АЭ контроле такого трубопровода во время испытания пробным давлением выявить дефекты, опасные в условиях эксплуатации трубопровода, будет почти невозможно.

При контроле технического состояния результаты расчета напряжений в условиях эксплуатации и испытаний позволяют оценить возможность выявления дефектов в конструкциях с применением метода АЭ, а также степень их выявляемости в условиях испытаний рабочим, испытательным и пробным давлением с контролем испытаний методом АЭ. Кроме того, по результатам анализа напряженного состояния можно определить наиболее опасные места конструкции и с учетом напряженного состояния оптимальным образом разместить преобразователи акустической эмиссии (ПАЭ).

Несомненный теоретический и практический интерес представляет установление связей и сопоставление параметров АЭ с рассчитанным напряженно-деформированным состоянием (НДС) конкретного материала. Существует взаимно однозначное соответствие между давлением и напряжениями в конструкции. Допускаемому давлению соответствует максимальный допустимый уровень напряжений, при котором имеется установленный запас до наступления предельного состояния. Предел текучести может быть превышен только в ограниченных по размеру зонах краевого эффекта и в зонах концентрации напряжений. Вероятность обнаружения дефекта, как концентратора, при АЭ контроле связана также и с нагруженностью контролируемого элемента конструкции. Если допускаемое давление для конструктивного элемента больше расчетного, напряжения в элементе будут незначительны, даже в зонах концентрации они могут быть значительно меньше предела текучести. В этих условиях, если дефект мал, будет сложно выделить полезный сигнал из помех, и вероятность обнаружения будет не велика.

Специалисты по АЭ контролю на практике оперируют с конкретными значениями давлений, а не с напряжениями (хотя АЭ - распространение волн напряжений). Известно, что давление в сосуде (при расчете и др.) находится в линейной зависимости от допускаемого напряжения: $[P]=k[\sigma]$. Поэтому при проведении АЭ контроля необходимо всегда иметь перед глазами выше- сказанное в графической форме:

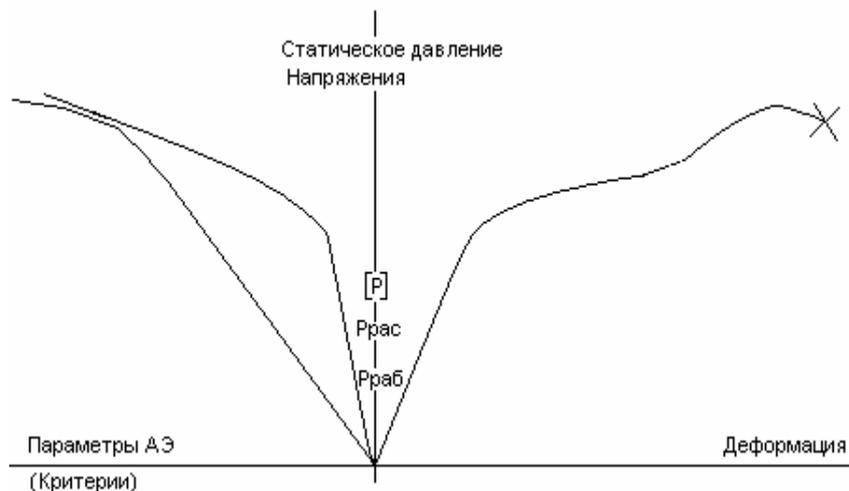


Рис. 1. Диаграмма давлений в номинальных зонах по ГОСТ 14249

В [2] отмечено что «особенностью метода АЭ является сложность выделения полезного сигнала из помех в том случае, когда дефект мал и вероятность выявления такого источника АЭ высока только при резком развитии дефекта и приближении его размеров к критическому значению». А если размер дефекта мал – он не снижает конструкционную прочность конструкции следовательно ее можно допустить к дальнейшей эксплуатации с данным дефектом, хотя по традиционным методам неразрушающего контроля такой дефект может быть и недопустимым.

В настоящее время при проведении и интерпретации результатов акустико-эмиссионного (АЭ) контроля отсутствуют критерии, которые разработаны при помощи расчетных физико-математических методов.

Большинство отечественных исследователей проводили разработку критериев на образцах, и в этом заложен глубокий физический смысл – небольшой фрагмент конструкции (инкремент) проходит как бы все стадии (уровни напряжений) эксплуатационных нагрузок вплоть до возможного разрушения объекта контроля (ОК). Заданному уровню напряжений в зоне АЭ контроля ставится в корреляционную зависимость регистрируемое акустическое поле излучения нагружаемого объема (участка) объекта контроля.

Главный недостаток такого подхода в том, что - акустическое поле образца формируется как излучением инкремента, так и огромным количеством переотражений акустического излучения от граней образца. Регистрация акустического поля ПАЭ на образцах происходит практически в ближней зоне (как правило, не более 10 см), тогда как в реальных условиях (в поисковом режиме) такой случай достаточно редкое совпадение. Акустические каналы в двух рассматриваемых случаях совершенно различны.

Логично возникает вопрос, каким образом можно компенсировать указанные недостатки? Для этого необходимо проводить нагружение инкремента контролируемого объекта непосредственно на контролируемом объекте, при этом регистрируя АЭ с реального акустического канала не одним, а несколькими ПАЭ установленными на объекте контроля. Помимо регистрации практически одинакового по механизму излучения с ОК это также позволит оценить влияние акустического канала на

АЭ информацию в зависимости от расстояния. Так как ПАЭ для локации можно ставить на различных расстояниях от имитатора.

Пусть имеется круглый пруток жестко закрепленный с одного конца, а с другого приложена к нему сила, действующая строго вниз.

Нагружение имитатора АЭ (инкремента) осуществляется в соответствии с выражением (1), где:

σ – уровень напряжений;

M – момент силы;

M_* - момент силы в расчетной точке;

W – сопротивление в сечении

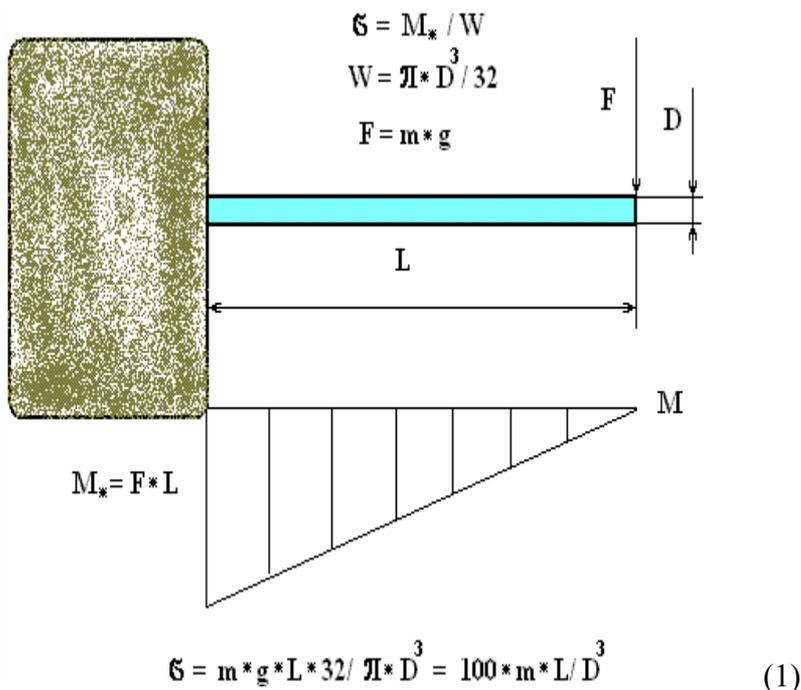
L – длина плеча, точка где приложена сила;

$\pi = 3,14$;

F – сила приложенная к плечу (сила тяжести, вес);

m – масса груза;

$g = 9,81 \text{ м/с}^2$ (ускорение свободного падения).



Размерность:

$$[\text{кг}] * [\text{м}/\text{с}^2] * [\text{мм}] / [\text{мм}^3] = [\text{Н}] / [\text{мм}^2] = [\text{МПа}] = 10 [\text{кгс}/\text{см}^2]$$

Физическое нагружение имитатора, также соблюдение скорости его нагружения может производиться в соответствии с последним выражением, и реально возможно двумя методами:

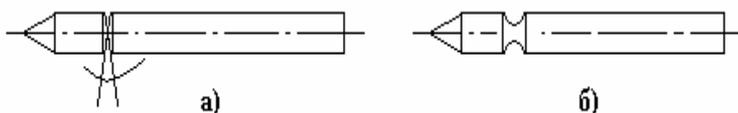
- при постоянно выбранной массе груза $m = \text{const}$, он перемещается по звукоизолирующей направляющей от 0 и до L -см;
- при постоянной длине звукоизолирующей направляющей, на конце которой происходит увеличение массы m (например, в бачок закрепленный на конце направляющей, наливается жидкость или насыпается груз, через расходомерное устройство).

Можно предложить данный алгоритм для применения и при АЭ мониторинге, что позволит проводить отработку критериев на реальных конструкциях. Особенно важно отметить следующее обстоятельство: создание контрольных маячков (как на стройке, для оценки процесса разрушения) – выбирается наиболее нагруженная зона на ОК, куда ставится рассматриваемый выше имитатор с уровнем напряжений, превышающим максимальный в ОК, и по его работе принимается решение.

Детали:

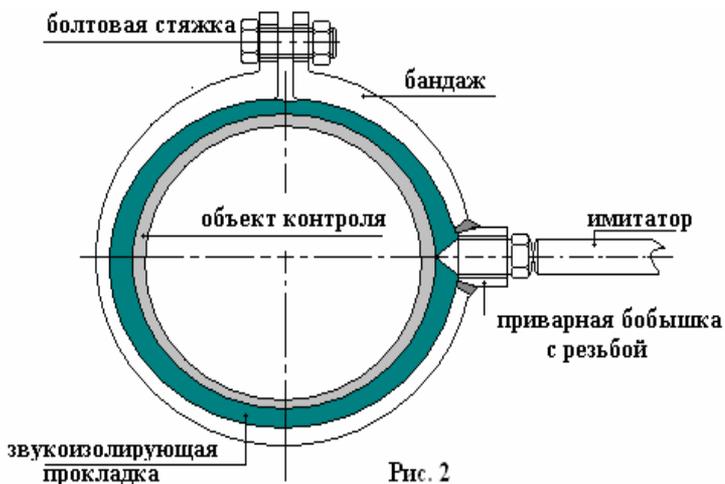
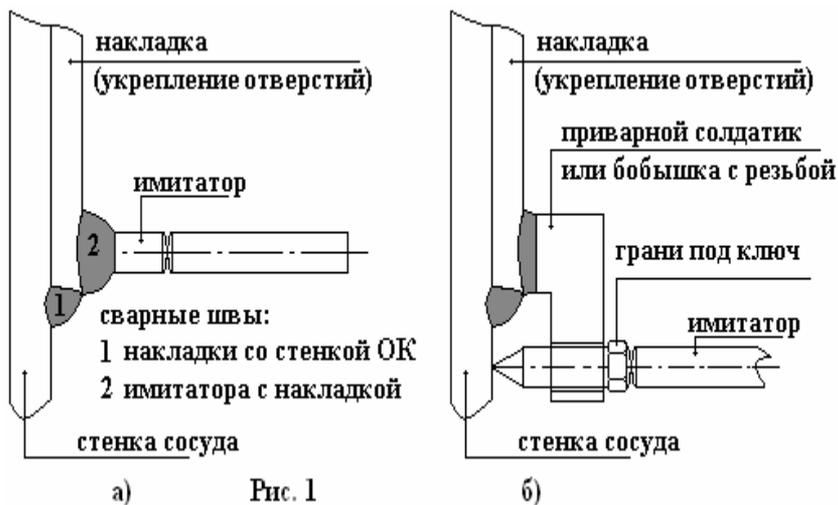
1) Тип концентратора.

Для концентрации зоны напряжений и локализации излучения источника АЭ лучше всего подходит нанесение на прутке концентрированного надреза:



2) Контактная площадка.

Для передачи акустического излучения от имитатора в ОК лучше всего подходит: а) приварка к объекту контроля (если нельзя непосредственно приварить к стенке ОК, привариваем к вспомогательным элементам конструкции: накладке, опоре, которые приварены к объекту контроля); б) сухой точечный контакт – с помощью приварных солдатиков, бобышек (рис. 1) или обхватывающих хомутов (рис. 2).



Силу прижатия имитатора к объекту контроля можно контролировать динамометрическим ключом.

Заключение

1. Предлагаемый способ разработки АЭ критериев позволяет, не доводя испытываемую конструкцию до разрушения моделировать

предельное состояние конструкции по параметрам АЭ сигналов с учетом физико-механических свойств материала – аналога конструкции.

2. Устанавливать корреляцию между НДС и параметрами АЭ и повысить достоверность результатов АЭ контроля.

3. Определять контролепригодность испытываемой конструкции для применения метода АЭ.

4. Оптимизировать размещение ПАЭ на объекте контроля.

P.S. 1. Можно или желательно ввести раздел в ПБ 03-593:

Экспериментальная технология разработки критериев АЭ используя данный материал.

P.S. 2. Это критерий АЭ мониторинга – создание реперных маячков + метрология акустических каналов.

Список литературы

ГОСТ 14249-89. Сосуды и аппараты. Нормы и методы расчета на прочность. ГО2.

РД 03-421-01. Методические указания по проведению диагностирования технического состояния и определению остаточного срока службы сосудов и аппаратов.

А.С. № 1637533 от 30.03.89 г. Миргазов В.А. и др. Способ контроля дефектов в изделиях по сигналам акустической эмиссии.

МОНИТОРИНГ ОБЪЕКТОВ, РАБОТАЮЩИХ ПРИ ПОВЫШЕННЫХ ТЕМПЕРАТУРАХ

Я.А. Полонский

(ОАО "ВНИКТИнефтехимоборудование", г. Волгоград)

Высокая температура эксплуатации технического устройства (ТУ), помимо того, что является самостоятельным фактором опасности, вносит серьезные затруднения в методологию, организацию и проведение мониторинга такого объекта.

Прежде всего, это обусловлено вносимой за счет высокой температуры эксплуатации заведомой нестационарностью структурно-фазового состояния материала ТУ, и, соответственно, служебных и физических характеристик материала. Если проблема изменения свойств материала, учитываемых при проведении расчетов на прочность и пластичность частично решается использованием соответствующих стандартизированных значений, то вопрос с изменением прочих характеристик (от трещиностойкости до акустических постоянных) остается открытым.

Меняется сама идеология мониторинга: от отслеживания сигналов развивающихся дефектов до, вообще говоря, собственно мониторинга состояния ТУ как комплекса конструкции и материального оформления. Т.е. центр тяжести мониторинга

смещается с мониторинга конструкции (трещины, износ) на мониторинг материала (ползучесть, деградация служебных характеристик). Мониторинг температуры, нагружающих усилий, и деформации ползучести, а также мониторинг состояния материала – микроструктуры, твердости, трещиностойкости, коррозионной стойкости: вот основные направления при реализации систем КДМ на высокотемпературных объектах.

Основные отличительные методические особенности мониторинга высокотемпературных объектов:

- трудности с аппаратным решением: датчики, выдерживающие высокую температуру стенки; частичный или полный переход на бесконтактные решения; необходимость сопровождающего мониторинга линейных размеров, температуры, механических свойств.

- необходимость получения и перманентного учета изменения свойств материала при эксплуатации (изменение характеристик, влияющих на анализ результатов мониторинга; на предельные значения критических параметров материала и объекта: трещиностойкость, запас пластичности, проч.)

- необходимость взаимного анализа получаемых при мониторинге данных для переопределения в реальном масштабе времени калибровочных и предельных значений.

- отсутствие принятых и утвержденных методических и, прежде всего, нормативных документов по специфике высокотемпературного мониторинга.

Таким образом, в своем высокотемпературном варианте, мониторинг становится в полном смысле этого слова комплексным, сочетая не только различные методы контроля и аппаратного сопровождения ТУ, но и сочетая отслеживание всех повреждающих факторов (ползучесть и разрушение, коррозия и вибрация); а также сочетая и стороны восприятия ТУ – и как конструкции и как материала.

ПРАКТИЧЕСКИЕ ВОПРОСЫ ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНОГО МОНИТОРИНГА

Я.А.Полонский

(ОАО «ВНИКТИнефтехимоборудование», г. Волгоград)

Расширение спектра применения систем КДМ на новые объекты и новые направления мониторинга влечет за собой ряд общих концептуальных проблем: создания соответствующей методической базы; отработки аппаратных схем мониторинга; обоснования величин предельных значений контролируемых параметров; достоверности оценки прямыми измерениями параметров, непосредственно отражающих служебные характеристики. Само понятие "комплексности" мониторинга несколько трансформируется – в сторону обеспечения возможности оценки контроленедоступного параметра за счет обобщения и анализа мониторингования группы косвенных, но доступных для аппаратной реализации.

Такое концептуальное переосмысление требуется при разработке систем КДМ печей, сосудов и трубопроводов, работающих при температурах развития процессов структурно-фазовых изменений и ползучести металла.

Вне сферы применения КДМ, такая задача решается преимущественно путем периодического накопленной деформации в отдельных зонах объекта. Этот, очевидно ограниченный и не

отвечающий современным требованиям подход, будучи системно переосмыслен, приводит к необходимости дополнительного температурного мониторинга, мониторинга физико-механического состояния металла и, главное, динамического переназначения предельных значений каждого из контролируемых параметров в зависимости от текущих значений всей совокупности контролируемых характеристик. Помимо программно-поддержанной системы экспертной оценки, такое решение нуждается в распределенных "реперных засечках" комплексного описания состояния металла, полученных в результате прямых лабораторных испытаний после сопоставимых по временным и нагрузочным характеристикам имитирующих и эксплуатационных воздействий.

Степень деградации металла - т.е. его текущая "несущая способность" - не может быть оценена прямыми измерениями, поэтому производится косвенно-аддитивная оценка на основе мониторинга микроструктуры, твердости, спектральных характеристик акустических колебаний и проч. Виды и способы контроля обосновываются индивидуально для каждого объекта, с учетом особенностей конструкции и условий службы. Труднореализуемые в непрерывном режиме мониторинга виды контроля дискретизируются с периодичностью, обеспечивающей не преодоление предельного значения в межинспекционный интервал. Неприменимые из-за температурных ограничений датчиков виды

мониторинга должны быть замещены другими, но с надежным запасом по полноте оценки состояния металла.

При "высокотемпературном мониторинге" предельные значения всех контролируемых параметров объекта так или иначе связаны с состоянием металла. Это значит, что их величина должна постоянно переопределяться на протяжении всего срока службы в зависимости от накопленной эксплуатационной наследственности объекта. Технически достоверное решение этой задачи предполагает авторское сопровождение - сочетание и совместный анализ лабораторного моделирования температурно-силового воздействия и результатов полевого мониторинга на протяжении всего времени применения системы КДМ.

**ИССЛЕДОВАНИЕ РАЗРУШЕНИЯ
КОНСТРУКЦИОННЫХ СТАЛЕЙ И
ОБСЛЕДОВАНИЕ ОПАСНЫХ
ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ ОБЪЕКТОВ МЕТОДОМ
АКУСТИЧЕСКОЙ ЭМИССИИ**

В.Н. Савельев (ООО «Прадиком», г.Санкт-Петербург)

К.Е. Нагинаев, (ДАО «Оргэнергогаз», г.Москва)

Метод акустической эмиссии (АЭ) широко применяется для исследования процесса разрушения различных материалов, как на лабораторных образцах, так и для определения реального технического состояния опасных производственных объектов.

Исследования проводились на модельных образцах, и на промышленных объектах, изготовленных из аналогичных по составу сталей.

Изучались закономерности наиболее часто встречающихся причин макроразрушения конструкций - усталостное разрушение стали и коррозионное растрескивание под напряжением.

Кинетику роста усталостной трещины (УТ) исследовали методом АЭ на среднем участке диаграммы циклического разрушения, где существует линейная связь между логарифмами коэффициента интенсивности разрушения и скорости роста трещины.

Испытание на коррозионное растрескивание под напряжением (КРН) проводилось на фрагменте трубопровода содержащего

кольцевой сварной шов.

Системой АЭ контроля регистрировались амплитудные и координатные распределения сигналов акустической эмиссии.

Исследование КРН проводилось также на фрагменте реального участка магистрального газопровода длиной 10 м, содержащего дефекты КРН глубиной до 10 % от толщины стенки и протяженную (длиной более 700 мм) трещину КР. При исследовании КРН фрагмента трубопровода были выполнены акустико-эмиссионные, тензометрические и ультразвуковые измерения, а также контроль параметров дефектов КРН вихретоковыми дефектоскопами.

По увеличению скорости накопления трещин, увеличению амплитуд сигналов АЭ и увеличению среднеквадратичного отклонения можно указать время формирования и дальнейшее развитие очага макроразрушения.

Результаты исследований УТ и КРН были успешно реализованы на различных промышленных объектах, например, на реакторе гидрокрекинга, в корпусе которого по результатам АЭ диагностирования выявлена трещина и предотвращено его разрушение.

Обсуждаются возможности АЭ метода для диагностики опасных производственных объектов.

АВТОМАТИЧЕСКОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ КООРДИНАТ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ АКУСТИЧЕСКОЙ ЭМИССИИ НА ОБЪЕКТЕ КОНТРОЛЯ

Д.А. Терентьев

(ООО «ИНТЕРЮНИС», г. Москва)

Современная акустико-эмиссионная (АЭ) аппаратура позволяет методом акустической локации определять координаты дефектов с высокой точностью, непосредственно в процессе сбора данных и в полностью автоматическом режиме. Однако сам процесс АЭ контроля объекта значительно усложняется подготовительными операциями, в частности, измерением координат всех установленных на объекте преобразователей акустической эмиссии (ПАЭ), особенно при их нахождении в труднодоступных местах.

Разработанная технология позволяет автоматизировать процесс нахождения координат АЭ преобразователей, что существенно упрощает и ускоряет проведение АЭ контроля. При этом важно отметить, что предложенный метод так же основан на акустической локации, что позволяет проводить его при помощи серийно выпускаемой АЭ аппаратуры и встроенных в нее функций.

Для реализации метода используется многоканальный аппаратно-программный комплекс «Лель /A-Line 32D (DDM)/» производства ООО «ИНТЕРЮНИС» [1, 2].



Рис. 1. Блок-схема метода

Блок-схема разработанного метода автоматического определения координат представлена на рис. 1. Сначала у некоторого небольшого числа ПАЭ, установленных на объекте контроля, измеряются и заносятся в компьютер геометрические координаты (далее в тексте эти преобразователи называются опорными). Минимальное число замеров, необходимое для привязки системы координат, образованной опорными преобразователями, к геометрии реального объекта, зависит от его формы и находится в диапазоне от 2 до 4.

Далее со всеми ПАЭ проводится следующая операция: по очереди каждый преобразователь при помощи встроенного имитатора сигналов АЭ излучает некоторое количество достаточно мощных импульсов, все остальные преобразователи эти сигналы принимают. Аппаратно-программный комплекс фиксирует и

записывает временные и энергетические параметры принятых и излученных сигналов, а также, по возможности, их осциллограммы.

Вторым этапом методики является программная обработка данных. Для каждого принятого сигнала определяется время Δt , за которое ультразвуковой сигнал преодолел расстояние между излучающим и принимающим ПАЭ. Для этого следует вычислить разность между временем прихода сигнала и временем ближайшего предшествовавшего ему излучения.

Избыточность входных данных делает возможной их фильтрацию, что позволяет увеличить точность определения координат ПАЭ.

В первую очередь отбрасываются переотраженные сигналы. В дальнейших расчетах участвуют только первые сигналы, приходящие после излучения на каждый из принимающих преобразователей. Кроме того, фильтруются сигналы, у которых время Δt превышает время, необходимое ультразвуковому сигналу для преодоления расстояния между двумя максимально удаленными точками на объекте.

Затем проводится фильтрация самых слабых сигналов в серии.

Фильтр сигналов с относительно большим значением времени нарастания амплитуды сигнала от пересечения порога до максимального значения позволяет исключить из расчетов значительное количество сигналов без выраженной формы.

Далее проводится фильтрация пар преобразователей с сильным разбросом значений Δt .

При помощи известных расстояний между опорными ПАЭ вычисляется скорость ультразвука V в объекте.

Затем все времена Δt , соответствующие каждой паре ПАЭ, усредняются и домножаются на скорость распространения ультразвука V в объекте контроля. Таким образом строится матрица $\mathbf{\Delta}$ расстояний между преобразователями размера $N \cdot N$, где N – число ПАЭ:

$$\mathbf{\Delta} = V \begin{pmatrix} 0 & \Delta t_{1,2} & \dots & \Delta t_{1,N-1} & \Delta t_{1,N} \\ \Delta t_{2,1} & 0 & \dots & \Delta t_{2,N-1} & \Delta t_{2,N} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ \Delta t_{N-1,1} & \Delta t_{N-1,2} & \dots & 0 & \Delta t_{N-1,N} \\ \Delta t_{N,1} & \Delta t_{N,2} & \dots & \Delta t_{N,N-1} & 0 \end{pmatrix}.$$

Далее элементы матрицы $\mathbf{\Delta}$ путем перебора проверяются на соответствие неравенству треугольника, согласно которому сумма длин двух сторон любого треугольника должна быть не меньше длины его третьей стороны, т.е.

$$\forall k : \mathbf{\Delta}_{i,j} \leq \mathbf{\Delta}_{i,k} + \mathbf{\Delta}_{k,j}.$$

Не удовлетворяющие этому неравенству элементы $\mathbf{\Delta}_{i,j}$ матрицы в дальнейших расчетах не участвуют.

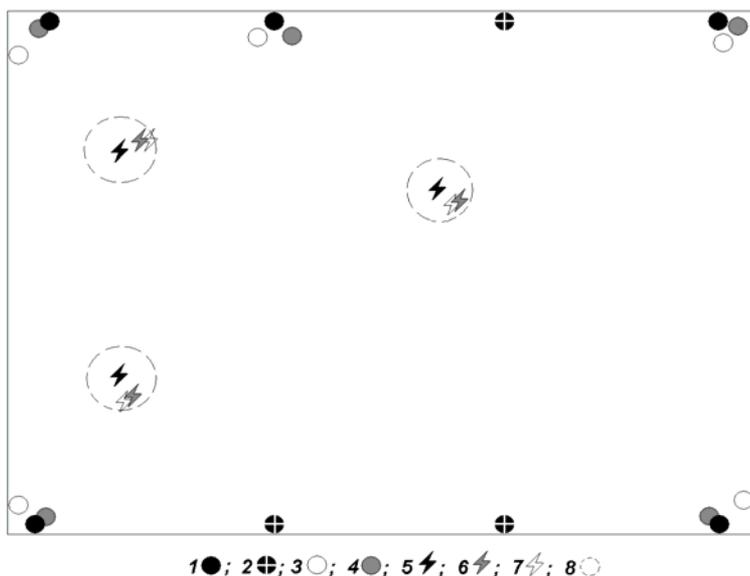


Рис. 2. Автоматическое определение координат ПАЭ и нахождение месторасположения дефектов на плоскости (масштаб не соблюден).

- 1 – реальное расположение ПАЭ;
- 2 – опорный ПАЭ;
- 3 – расположение ПАЭ, посчитанное в нулевом приближении;
- 4 – расположение ПАЭ, уточненное методом итераций;
- 5 – реальное расположение дефекта (источника АЭ);
- 6 – расположение дефекта, определенное обычным способом;
- 7 – расположение дефекта, определенное при использовании предлагаемой методики;
- 8 – зона 5-процентной ошибки.

Следующий шаг – восстановление координат преобразователей из матрицы расстояний между ними Δ . Сначала для каждого ПАЭ с неизмеренными координатами по расстояниям до ближайших опорных преобразователей вычисляется в нулевом приближении его местоположение. Затем получившееся решение уточняется специально разработанным методом итераций, который учитывает $N(N-1)/2$ расстояний между парами ПАЭ (а не $2(N-3)$, как при

расчете нулевого приближения) и естественным образом усредняет ошибки измерений. Предложенный алгоритм позволяет решать данную задачу практически при любой геометрии объекта контроля.

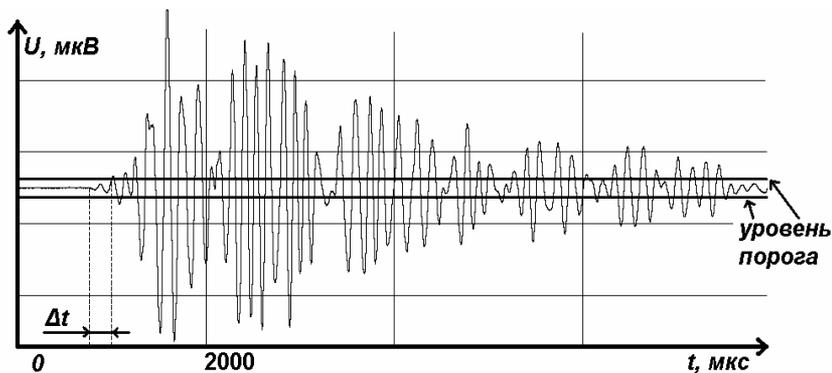


Рис. 3. Возникновение погрешности при автоматическом определении момента прихода сигнала по превышению порога

Экспериментальная проверка проводилась на металлических и железобетонных конструкциях плоской, сферической и цилиндрической формы.

Опыты показали, что в случае металлического объекта (использовалась сфера радиуса 5 м) описанная методика позволяет определять координаты ПАЭ с ошибкой, равной 1.7-3.6% от характерного расстояния между ПАЭ (рис. 2).

Было выявлено, что использование найденных описанным способом координат ПАЭ вместо истинных приводит к появлению ошибки локации источников АЭ, примерно равной средней ошибке определения координат ПАЭ, участвующих в локации дефекта (рис. 2). Таким образом, на металлических конструкциях при использовании автоматически определяемых координат ПАЭ

погрешность локации источника АЭ не превышает 5% от расстояния между преобразователями, согласно требованиям [3].

При применении разработанной методики к бетонным объектам (исследовалась плита 3x5 м) возникли некоторые трудности. Низкая (по сравнению с металлом) основная частота АЭ сигнала в бетоне приводила к большим погрешностям при автоматическом определении момента прихода сигнала по превышению порога (рис. 3). Положительных результатов удалось добиться только путем уточнения времени прихода по осциллограмм сигналов, например, при помощи вейвлет-спектрограмм [4]. Характерная ошибка определения координат преобразователей в этом случае равнялась 6% от среднего расстояния между ПАЭ. Альтернативным способом повышения точности работы метода является использование специальной формы излучаемого импульса.

Выводы

1. Разработан алгоритм, позволяющий автоматизировать процесс нахождения геометрических координат ПАЭ на объектах различной формы и использующий для их расчета все расстояния между ПАЭ, найденные методом акустической локации.

2. Произведена экспериментальная проверка, показавшая, что при применении описанного алгоритма на металлических конструкциях погрешность локации источника АЭ удовлетворяет стандартам акустической эмиссии.

3. Дальнейшее увеличение точности определения координат ПАЭ возможно при уточнении момента прихода сигнала за счет

использования импульсов специальной формы или применения спектрограмм.

Список литературы

1. Патент RU 44390 U1, 10.03.2005.
2. <http://www.interunis.ru/>
3. Правила организации и проведения акустико-эмиссионного контроля сосудов, аппаратов, котлов и технологических трубопроводов (ПБ 03-593-03).
4. В.А. Барат, А.Л. Алякритский. Статистический метод обработки сигналов акустической эмиссии и их параметров для повышения достоверностей результатов контроля. Материалы XVII Российской научно-технической конференции «Неразрушающий контроль и диагностика». Екатеринбург, УГТУ-УПИ, 5-11 сентября 2005.
5. Терентьев Д.А., Алякритский А.Л., Ростовцев М.Ю. Автоматическое определение координат преобразователей на объекте при акустико-эмиссионном контроле. - Контроль. Диагностика, 2007, №1, с. 31-34.

О ЦЕЛЯХ И ЗАДАЧАХ ДИАГНОСТИРОВАНИЯ ТРУБОПРОВОДНОЙ АРМАТУРЫ

Н.П. Тютюнник

*(ЗАО "Киевское Центральное Конструкторское Бюро
Арматуростроения", г. Киев)*

1. Экономические и технические причины необходимости технического диагностирования трубопроводной арматуры:
 - 1.1. необходимость определения вида технического состояния арматуры и технического диагностирования с целью продления назначенного срока службы;
 - 1.2. контроль технического состояния арматуры с целью перехода от обслуживания арматуры «по регламенту» к «обслуживанию по техническому состоянию»;
 - 1.3. необходимость определения вида технического состояния и технического диагностирования арматуры на опасных производственных объектах.
2. Нормативная база:
 - 2.1. нормативные документы Украины;
 - 2.2. нормативные документы Российской Федерации;
 - 2.3. нормативные документы Европейского Союза.
3. Цели и задачи технического диагностирования трубопроводной арматуры:
 - 3.1. цели и задачи предприятий, эксплуатирующих арматуру;

- 3.2. цели и задачи конструкторских организаций и предприятий производителей арматуры;
 - 3.2.1. обеспечение возможности диагностирования арматуры, находящейся в эксплуатации;
 - 3.2.2. обеспечение контролепригодности и диагноstopригодности арматуры, выпускаемой в соответствии с действующими нормативными документами;
 - 3.2.3. разработка арматуры нового поколения, приспособленной к диагностированию и оснащенной встроенными средствами диагностики.
4. Задачи контроля технического состояния и диагностирования трубопроводной арматуры:
 - 4.1. определение вида технического состояния;
 - 4.2. диагностирование функциональной готовности
 - 4.3. определение остаточного ресурса.
5. Технические средства контроля технического состояния и технического диагностирования:
 - 5.1. для диагностирования корпусов арматуры;
 - 5.2. для диагностирования электроприводов арматуры;
 - 5.3. для диагностирования кинематической цепочки;
 - 5.4. для диагностирования уплотнений и сильфонов;
 - 5.5. для диагностирования затворного узла.

**МЕСТО АЭ-КОНТРОЛЯ В НОРМАТИВНЫХ
ДОКУМЕНТАХ
НАУЧНО-ПРОМЫШЛЕННОГО СОЮЗА
«РИСКОМ» ПО ЭКСПЕРТИЗЕ ПРОМЫШЛЕННОЙ
БЕЗОПАСНОСТИ РЕЗЕРВУАРНЫХ
КОНСТРУКЦИЙ**

Х.М. Ханухов, к.т.н., член корр. АИН РФ,

А.В. Алипов, к.ф.-м.н.

(«НПК Изотермик», г. Москва)

В докладе рассматриваются два нормативных документа, разработанных союзом РИСКОМ:

1) «Вертикальные стальные резервуары для нефти и нефтепродуктов. Экспертиза безопасности и техническая диагностика» (стандарт РИСКОМ СТО 03-001-06);

2) «Инструкция по проведению комплексной технической диагностики изотермических резервуаров сжиженных газов» (переработанный РД 03-410-01).

В действовавших ранее нормативных документах по технической диагностике вертикальных стальных резервуаров (РВС) недостаточное внимание уделено статусу АЭ-контроля, механизму, побуждающему владельцев резервуаров применять дорогостоящий метод акустической эмиссии при технической диагностике.

В основных нормативных документах по обследованию резервуаров - РД 08-95-95, РД 153.112.117-97, ИТН-93 нет упоминания о методе акустической эмиссии. В РД 03-593-03 – основном отечественном нормативном документе по технологии применения метода акустической эмиссии – нет раздела, посвященного резервуарам.

В стандарте РИСКОМ СТО 03-001-06 применению метода АЭ при обследовании РВС отведено более 40 страниц текста, это наиболее полное в отечественной технической литературе описание технологии АЭ-контроля вертикальных резервуаров.

В рассматриваемом документе установлен следующий порядок применения АЭ-контроля.

При невозможности освобождения резервуара от продукта очередное полное обследование может быть заменено частичным обследованием без освобождения резервуара от продукта, включающим дополнительно следующие операции:

- испытания резервуара на прочность продуктом с обязательным контролем методом акустической эмиссии;

- дополнительное сканирование толщины первого пояса стенки резервуара (или зоны раздела подтоварной воды и продукта хранения при нахождении ее выше низа первого пояса);

- дополнительный ультразвуковой контроль всех вертикальных сварных соединений первого пояса стенки резервуара на высоту 0,5 м.

При замене полного обследования на частичное, выполняемое по расширенной программе, максимальный срок дальнейшей эксплуатации до проведения очередного полного обследования не может превышать минимальное из значений:

- 1) нормативного интервала времени до проведения следующего частичного обследования, составляющего в зависимости от коррозионной активности хранимого продукта от двух до пяти лет;
- 2) расчетного остаточного ресурса.

(При проведении полного обследования снаружи и изнутри резервуара максимальный назначаемый срок до проведения следующего полного обследования в зависимости от коррозионной активности хранимого продукта составляет от четырех до десяти лет).

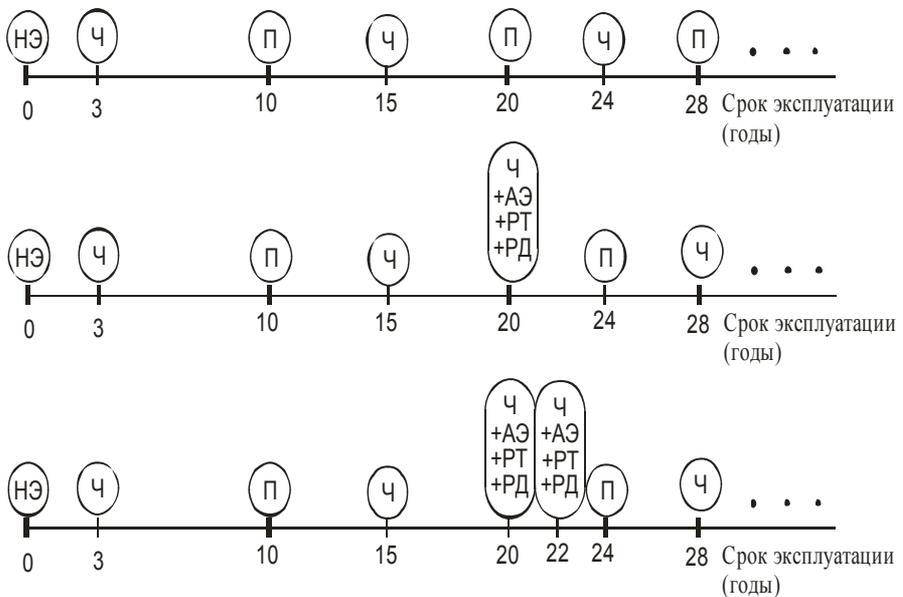
Испытания резервуара на прочность могут проводиться или путем налива воды (гидроиспытания), или в режиме эксплуатации путем повышения до максимального значения уровня налива продукта и создания избыточного давления, предусмотренного проектом резервуара (как правило, 200 мм вод. ст.) в режиме эксплуатации.

Гидроиспытания резервуара в обязательном порядке проводятся при приемке резервуара из монтажа, а также после проведения ремонта стенки или днища резервуара с применением сварки при площади замененных участков стенки или днища более 10 м². При меньшей площади замененных участков допускается производить контроль качества сварных соединений в объеме 100% неразрушающими методами, применяя, кроме визуально-

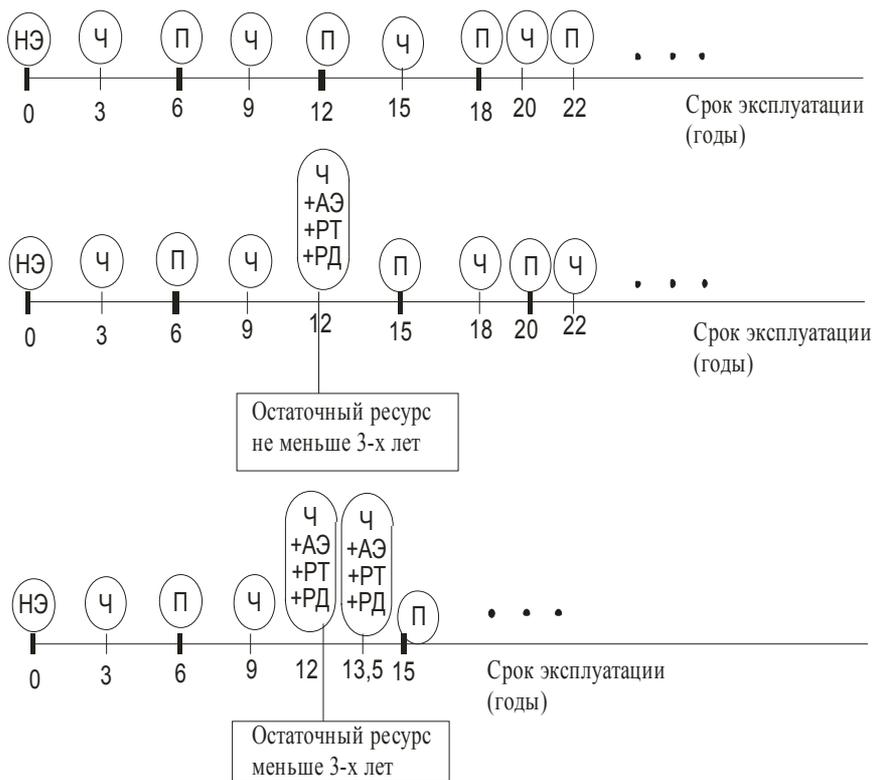
измерительного контроля, два метода: один из которых должен предназначаться для обнаружения поверхностных дефектов, другой – для обнаружения глубинных дефектов сварных соединений.

В процессе гидроиспытаний для повышения безопасности рекомендуется контролировать состояние резервуара методом акустической эмиссии (АЭ). При испытаниях наливом продукта АЭ контроль обязателен.

Возможные схемы технического диагностирования с применением АЭ-контроля приведены на рис. 1.



а) резервуар 3-го класса опасности, содержащий светлые нефтепродукты.



б) резервуар 1-го класса опасности, содержащий товарную нефть.

Рис. 1. Примеры возможных схем очередности технического диагностирования.

НЭ – начало эксплуатации, *Ч* – частичное диагностирование, *П* – полное диагностирование, *АЭ* – АЭ контроль испытаний на прочность продуктом, *РТ* – расширенная толщинометрия, *РД* – расширенная дефектоскопия (УЗК контроль).

При испытаниях РВС на прочность гидростатическая нагрузка должна не менее чем на 5% превышать эксплуатационную нагрузку. При гидроиспытаниях это достигается за счет более высокой плотности воды по сравнению с плотностью нефтепродуктов. При испытаниях на прочность в режиме

эксплуатации требуется повышение уровня налива рабочей среды. В случае невозможности этого (если резервуар эксплуатировался ранее при максимальном уровне налива), временно, до следующего полного обследования, максимальный эксплуатационный уровень налива в заключении ЭПБ может быть установлен в размере 95% от уровня налива при испытаниях на прочность продуктом.

В 2005 году решением секции по акустической эмиссии Научно-технического Совета Ростехнадзора НПК «Изотермик» совместно с ГИАПДистцентр поручено доработать «Инструкцию по проведению комплексной технической диагностики изотермических резервуаров сжиженных газов (ИР)» (РД 03-410-01) в части более четкого описания статуса и техники акустико-эмиссионного контроля ИР.

Такая доработка к настоящему времени проведена. Согласно новой редакции инструкции при проведении полного технического диагностирования изотермических резервуаров возможны два варианта применения акустико-эмиссионного метода.

Первый вариант: Если сопровождающей нагрузкой при АЭ контроле является комбинированное гидропневмонагружение, АЭ контроль может быть основным методом неразрушающего контроля. В этом случае при положительных результатах АЭ контроля (отсутствии развивающихся дефектов или мест утечки продукта) применение других методов неразрушающего контроля несущей стенки и кровли резервуара не требуется, достаточно только измерение толщины элементов резервуара и визуально-измерительный контроль снаружи и внутри резервуара.

Гидропневмонагружение может быть создано двумя способами:

- 1) в режиме эксплуатации (до освобождения хранилища от продукта) - путем дополнительного повышения уровня хранимого продукта на 5 – 10% и дополнительного создания инертным газом избыточного давления, равного проектному избыточному давлению или рабочему давлению с коэффициентом запаса 1,2;
- 2) в режиме гидроиспытаний резервуара с дополнительным созданием избыточного давления.

Необходимым условием для применения АЭ-метода в качестве основного метода НК является наличие оснастки (устройств), допускающей установку ПАЭ на работающем резервуаре (например, в двустенных резервуарах - наличие кессонов, в одностенных резервуарах - наличие системы ПАЭ, стационарно установленных на стенке резервуара под теплоизоляцией или возможность вырезки окон в теплоизоляции).

Второй вариант: При невозможности обеспечить установку ПАЭ на наружной поверхности несущей стенки резервуара или при невозможности обеспечения гидропневмонагружения АЭ-метод контроля может быть применен в качестве дополнительного наряду с другими методами неразрушающего контроля (ультразвуковым, капиллярным, магнитопорошковым, магнитной памяти металла и др.). Сопровождающей нагрузкой в этом случае должно быть пневмонагружение инертным газом.

Цели применения АЭ-контроля в этом случае: 1) повышение надежности результатов обследования; 2) значительное сокращение

объема неразрушающего контроля другими методами верхней части стенки и кровли ИР.

В настоящее время новая редакция инструкции проходит стадию рассмотрения и редактирования в организациях - членах союза РИСКОМ.

НОВЫЕ НОРМАТИВНЫЕ ДОКУМЕНТЫ ПО ЭКСПЕРТИЗЕ ПРОМЫШЛЕННОЙ БЕЗОПАСНОСТИ ЗДАНИЙ И СООРУЖЕНИЙ, РЕЗЕРВУАРОВ ДЛЯ НЕФТИ И НЕФТЕПРОДУКТОВ

Х.М. Ханухов

(ООО “НПК Изотермик”, г. Москва)

Представляется стандарт Научно-промышленного союза «РИСКОМ» и Ассоциации «Ростехэкспертиза» «Методические указания по проведению технического обслуживания, ремонта, обследования, экспертизы промышленной безопасности производственных зданий и сооружений предприятий, эксплуатирующих взрывопожароопасные и химически опасные объекты».

Настоящий стандарт содержит методики и практические рекомендации по проведению экспертизы промышленной безопасности строительных конструкций основных и вспомогательных производственных зданий и сооружений, включая дымовые и вентиляционные промышленные трубы, на опасных производственных объектах.

В стандарте изложена методика обследования строительных конструкций и оценки технического состояния объекта, установлены требования к порядку проведения экспертизы промышленной безопасности производственных зданий и

сооружений и оформления заключения экспертизы. Стандарт устанавливает нормативные сроки службы зданий и сооружений, включая дымовые и вентиляционные промышленные трубы, периодичность капитального ремонта и сроки проведения экспертизы промышленной безопасности. В стандарте также учтены особенности проведения экспертизы промышленной безопасности производственных зданий и сооружений в сейсмических районах.

Впервые, в одном нормативном документе представлен единый методический подход к экспертизе промышленной безопасности производственных зданий и сооружений, включая промышленные дымовые и вентиляционные трубы, эксплуатируемые в различных отраслях промышленности, с учетом категоричности помещений, степени агрессивности воздействия газовой среды, динамических нагрузок, а также нахождения опасных производственных объектов в сейсмических районах.

Данный руководящий документ не имеет аналогов в отечественной нормативно-технической литературе. Впервые даны не только основные дефекты и повреждения конструктивных элементов зданий и сооружений, а также дымовых и вентиляционных промышленных труб, но и их предельно допустимые значения.

Следующий стандарт Научно-промышленного союза «РИСКОМ» и Ассоциации «Ростехэкспертиза» носит название «Резервуары вертикальные стальные сварные для нефти и

нефтепродуктов. Техническое диагностирование и экспертиза безопасности» (Методические указания).

Данный документ содержит новые положения, к которым относятся:

- зависимость периодичности обследования от класса опасности резервуара и вида хранимого в нем продукта;
- наиболее полное изложение методики акустико-эмиссионного контроля стенок резервуаров (на предмет обнаружения растущих дефектов) и днищ резервуаров (на предмет обнаружения зон значительной коррозии);
- численные значения отбраковочных размеров дефектов сварных соединений, обнаруживаемых различными методами неразрушающего контроля;
- расчет остаточного ресурса резервуара с учетом неоднородности распределения глубины коррозии по площади поверхности на основе методики гамма-процентного ресурса;
- методика расчета неоднородной осадки основания резервуара;
- методики всех необходимых расчетов резервуара на прочность, устойчивость, малоцикловую усталость и др. с учетом несовершенств формы, дефектов сварных соединений и др., а также ряд других новых положений.

Большое количество справочной информации, содержащейся в этом документе, позволяет использовать его при ЭПБ резервуаров без обращения к другим нормативным документам. Комплексность диагностических и расчетных методов при ЭПБ резервуаров

позволяет научно обоснованно прогнозировать остаточный ресурс их безопасной эксплуатации.

По широте и комплексности охвата рассматриваемых вопросов, использованию новейших методов диагностирования и расчета остаточного ресурса данный документ не имеет аналогов не только в отечественной, но и в мировой нормативно-технической литературе.