УДК 621.19.40 DOI: http://dx.doi.org/10.15407/tdnk2019.01.01

ОСОБЕННОСТИ АЭ ДИАГНОСТИКИ. ТЕХНОЛОГИЯ, АППАРАТУРА И АЛГОРИТМЫ

С.А. Недосека, А.Я. Недосека, М.А. Яременко, М.А. Овсиенко, О.И. Бойчук, И.Г. Волошкевич

ИЭС им. Е.О. Патона НАН Украины. 03150, г. Киев, ул. Казимира Малевича, 11. E-mail: office@paton.kiev.ua

Сформулированы основные требования к диагностированию конструкций в процессе эксплуатации. Поэтапно рассмотрено получение информации, которую должны выдавать мониторинговые системы после обработки первоначально поступивших данных. Показано, что разработанная совместно с венгерскими специалистами система непрерывного мониторинга конструкций позволяет оценивать и прогнозировать их состояние как в процессе кратковременных испытаний, так и в процессе эксплуатации. Система в состоянии решать практически все основные вопросы, связанные с обеспечением безопасности конструкций при эксплуатации. Библиогр. 18, рис. 9.

Ключевые слова: диагностирование конструкций, акустическая эмиссия, мониторинговые системы, оценка состояния конструкций

Нормативная документация (НД) по технической диагностике (ТД) конструкций [1, 2] требует для принятия решения об их состоянии получения четко определенной информации. Другими словами, техническое диагностирование должно быть направлено на решение таких задач:

– определение вида технического состояния;

– поиск места отказа или неисправности;

– прогнозирование технического состояния.

Для проведения диагностирования необходимо следующее:

– диагностическая модель изделия;

– алгоритм диагностирования и программное обеспечение;

– правила измерения диагностических параметров;

– правила обработки, анализа диагностической информации и принятия решения.

Собственно прогнозирование технического состояния должно определять:

– числовое значение параметров состояния на задаваемый период времени, в том числе и на момент проведения текущего измерения;

– числовое значение остаточного ресурса или допустимой наработки с учетом заданной вероятности;

– нижнюю границу вероятности безотказной работы по параметрам безопасности на задаваемый промежуток времени.

Создание контролирующей аппаратуры с такими возможностями является задачей достаточно сложной. Следует отметить, что практически все традиционные методы неразрушающего контроля (НК) не позволяют получить те параметры дефекта, которые необходимы для принятия решения о состоянии материала конструкции [3].

В то же время, расчеты на прочность методами механики разрушения требуют от специалистов в области НК знания параметров, характеризующих дефект: внутреннее расположение дефекта, его размеры, конфигурацию, положение по отношению к главной оси расчета и ряд других. Исходя из этого, были проведены исследования [3] и показано, что данных, которые дают обычные методы НК, недостаточно для того, чтобы принять взвешенное решение в соответствии с НД по ТД. В некоторых случаях проводили испытании до разрушения конструкции в целом с теми дефектами, которые в ней были заложены при изготовлении. Затем по результатам испытаний одного изделия принимали решение, можно ли эксплуатировать другие подобные изделия. Однако это очень дорогостоящий подход, и позволить оценивать состояние конструкций подобным образом могут лишь организации, обладающие необходимыми достаточно большими ресурсами.

После ввода в эксплуатацию, в процессе наработки появляются новые дефекты или начинают влиять на прочность материала те, которые были пропущены ранее, при контроле на стадии изготовления. Требуется достоверная оценка фактического состояния конструкции, причем без ее разборки и, желательно, без вывода из эксплуатации, на рабочих параметрах. Одним из наиболее перспективных методов контроля в этом случае становится метод, основанный на явлении акустической эмиссии (АЭ), возникающей в материалах при перестройке их структуры под воздействием деформации или других физических полей, при этом возникающие в материале волны могут распространяться на большие расстояния.

© С.А. Недосека, А.Я. Недосека, М.А. Яременко, М.А. Овсиенко, О.И. Бойчук, И.Г. Волошкевич, 2019

Благодаря указанной особенности, контролирующие системы, созданные на базе АЭ, могут решать задачи мониторинга, в том числе непрерывного, и оценки на основе получаемых АЭ данных состояния конструкций независимо от их размеров и условий эксплуатации. Представленные ниже материалы описывают основные возможности современных систем ТД на основе АЭ, которые работают в полном соответствии с НД по техническому диагностированию и могут непрерывно контролировать различные объекты из единого центра. При этом конструкции, оснащенные такой аппаратурой, могут находиться в любой точке земного шара. Применение систем мониторинга возможно и для управления эксплуатацией конструкций. Такие системы работают в Украине уже 18 лет.

Следует отметить, что постепенный переход на непрерывный мониторинг конструкций в процессе их эксплуатации стал мировой тенденцией. Это связано прежде всего с экономическими показателями. Намного выгоднее и дешевле продлить срок эксплуатации конструкции, чем проводить ее плановую замену в соответствии с НД. С другой стороны, непрерывный контроль работоспособности конструкций дает возможность быстро отреагировать на ее состояние и тем самым избежать аварии. Учитывая сказанное выше, отметим, что на заседании Международного института сварки (МИС) в 2015 г. в Хельсинки, где присутствовало более 60 представителей из 17 стран, что демонстрирует важность этого форума, было принято решение о перспективности направления мониторинга технического состояния конструкций и необходимости сосредоточить усилия на его развитии [4].

Основная информация, которую должны выдавать современные мониторинговые системы после обработки первоначально поступивших данных [5, 6]:

– указание места, где формируется и может произойти разрушение;

– определение степени опасности состояния конструкции;

– прогноз разрушающей нагрузки;

– определение предела прочности материала конструкции (для конструкций с существенной наработкой – предела длительной прочности) в любой момент времени ее эксплуатации;

– расчет и оценка остаточного ресурса эксплуатирующейся конструкции;

– оценка энергии, затрачиваемой на развитие разрушения;

– рекомендации по дальнейшей эксплуатации конструкции.

Задача получения этой информации ложится на программное обеспечение (ПО) систем, что показывает его важность в реализации АЭ технологии, поскольку без него измерительный АЭ прибор не имеет самостоятельной ценности.

Отметим, что основные идеи построения прогнозирующих мониторинговых систем с дистанционным контролем были представлены в ИЭС им. Е.О. Патона еще в 1974 г. [7]. С тех пор они постоянно развивались, что привело, в конечном счете, к современной постановке задач мониторинга и управления эксплуатацией конструкций. Параллельно создавались и совершенствовались приборы для АЭ контроля и соответствующее ПО. Сегодня эксплуатируются как стационарные, так и мобильные АЭ системы ЕМА 3-го и 4-го поколений. Технология измерений также постоянно совершенствуется и согласовывается с разработчиком аппаратуры. Стандартизован протокол обмена данными между приборами АЭ и управляющими компьютерами. Отметим, что, начиная с 1997 г., выполнен переход к многозадачному ПО на основе операционных систем Windows, к 2000 г. решен вопрос прогнозирования разрушающей нагрузки по данным АЭ и эксплуатационных параметров. В 2000 г. поставлена и решена задача связи измерительного оборудования с управляющими компьютерами на основе протоколов Интернета и интеграции таких систем в компьютерные сети предприятий. Начиная с 2001 г. на Одесском припортовом заводе (ОПЗ) впервые в Украине начато последовательное внедрение систем непрерывного АЭ мониторинга на наиболее опасных объектах завода, которые сегодня контролируют состояние оборудования цехов перегрузки и производства аммиака, а также ряд других потенциально опасных участков. Опыт эксплуатации мониторинговых систем в сетях показал, в числе прочего, эффективность выбора технологии XML для обмена диагностическими данными между различными компонентами систем и для накопления статистической информации по результатам выданных предупреждений об опасности и прогноза разрушения. В 2004 г. начато оснащение непрерывным АЭ мониторингом аммиакопроводов, проходящих по мостовым переходам, в том числе установлена такая система на километровом участке перехода через р. Днепр. По мере внедрения мониторинговых систем продолжалось их совершенствование, что позволило, в частности, перейти к контролю высокотемпературных объектов и оснастить системами непрерывного мониторинга паропроводы и барабаны котлов на киевских ТЭЦ-5 и ТЭЦ-6.

В работу действующих на мониторинговых системах алгоритмов оценки состояния материала конструкций заложен метод распознавания образов, что позволило свести ошибки оценок до ми-

нимума и получать результаты при вероятности 0,95 с погрешностью, не превышающей 15 %. Такая точность прогноза состояния материала подтверждена и в рамках совместных со специалистами из Венгрии, Австрии, Германии и Украины испытаниях сосудов давления, показав более чем удовлетворительные результаты [8]. Реальная погрешность прогноза составила менее 5 %.

Рассмотрим более подробно схему решения задачи оценки состояния материала (рис. 1).

Информация с контролируемого объекта постоянно поступает в аналитический блок системы непрерывного мониторинга, где формируется вектор состояния материала (ВСМ). Кроме АЭ информации на вход аналитического блока поступает также необходимая для принятия решения дополнительная информация (давление, усилие, температура и другие данные силового или другого воздействия на конструкцию). После предварительной обработки (фильтрации) этой информации начинает работать блок эталонов (учитель), который производит предварительное сравнение поступающей информации с эталонными значениями, полученными ранее при проведении исследований материалов. Если наблюдается невязка поступающей информации с эталоном, подключается блок коррекции (самообучение). Этот блок пытается нивелировать невязку до допустимой условиями испытания величины. Отвечающая этим условиям информация поступает в блок принятия решения, где формируется оптимальный вариант. Выходной информацией является прогнозное значение разрушения с заданной вероятностью.

Рассмотрим детальнее способы обеспечения указанных возможностей метода АЭ построенной на его основе аппаратурой. Отметим, что помимо систем семейства ЕМА, другие существующие аналоги АЭ систем из перечисленных выше пунктов выходной информации при мониторинге обеспечивают чаще всего только первый и, в редких случаях, второй. Тем не менее, понимание важности всесторонней оценки состояния конструкций постепенно выходит на необходимый уровень, и буквально в последнее время в публикациях и научных темах на Западе все чаще встречается понятие «Structure health monitoring» – дословно «Наблюдение за состоянием здоровья конструкции», в основном как перспективная для разработки тема. В то же время, в Украине эта проблема уже давно решена и нашла относительно широкое внедрение.

Стало это возможным, отчасти, за счет разделения труда между разработчиками АЭ оборудования и специалистами в области оценки состояния материала по данным АЭ. Очевидно, что этим должны заниматься профессионалы разного профиля, решая каждый свою часть задачи, но в тесной координации.

Опыт венгерских специалистов-электронщиков в сочетании с высокой культурой изготовления приборной части АЭ систем в производственных условиях Европы позволили создать высококачественный вариант аппаратуры с высокой скоростью обработки информации, миниатюрными габаритами и малым весом.

Опыт специалистов ИЭС в области прочности и безопасности конструкций, разработке АЭ технологии и соответствующего ПО позволил вести

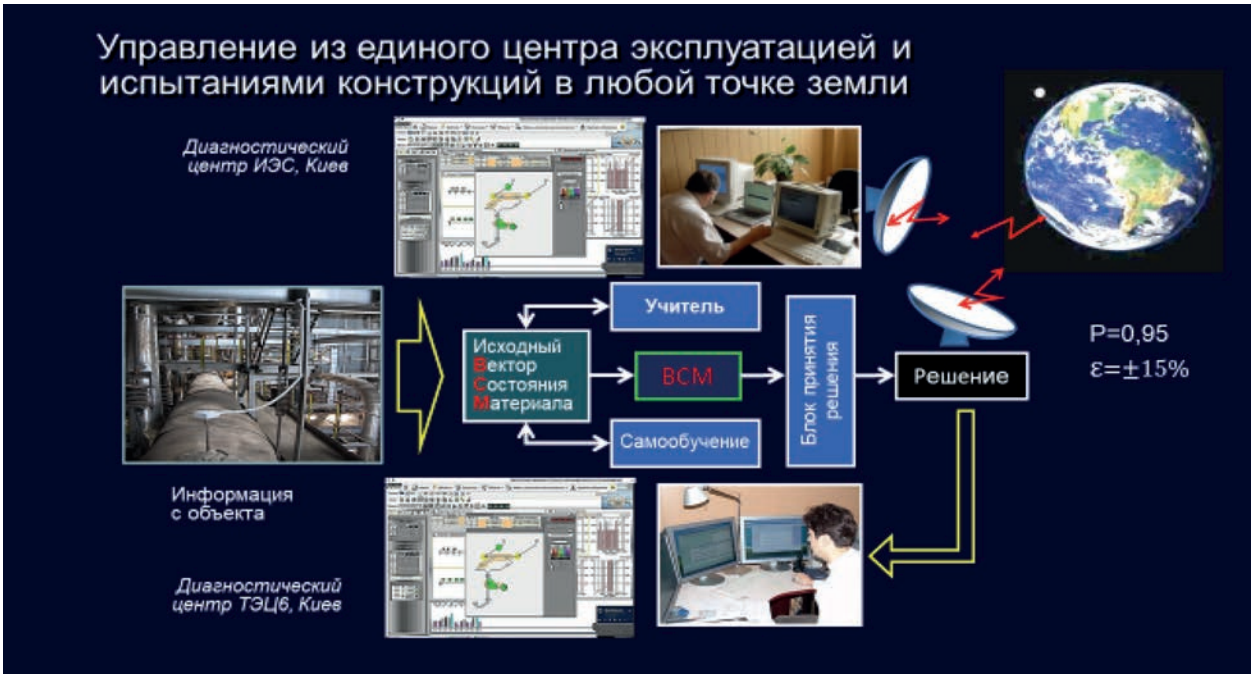


Рис. 1. Схема управления эксплуатацией конструкций, находящихся в любой точке Земли, из единого центра

разработку принципов и методов работы мониторинговых систем путем, который является полностью оригинальным [9].

Несмотря на то, что определение координат источников АЭ выполняют практически все современные многоканальные АЭ системы, технология обработки данных систем ЕМА предусматривает специфические методы выделения отдельных событий и расчета их координат. В частности, используются два различных метода расчета координат – на основе математических формул и с помощью так называемой матричной локации, когда заранее составляется матрица задержек времен прихода сигналов АЭ к датчикам из разных точек для выбранной локационной схемы, а затем получаемые при измерениях задержки сравниваются с матричными и выбираются наиболее подходящие координаты. Для выбора наиболее оптимального метода локации создана автоматизированная система проверки точности локации, задающая виртуальные источники АЭ с последующим расчетом задержек сигналов, а затем вводящая эти задержки в расчетные формулы. Полученная погрешность отображается в виде таблиц и графиков для каждого из заданных для виртуальных источников наборов координат.

После определения координат событий АЭ выполняется их многопараметрический кластерный анализ [10, 11]. При этом зафиксированные системой события АЭ объединяются по заданной группе признаков, и дальнейшая обработка групп полученных событий производится применительно к каждому отдельному кластеру. Приведенная схема (рис. 1) работает независимо для каждого кластера, в результате чего определение уровня опасности и прогноз разрушения относятся к конкретному участку объекта контроля, размеры которого можно варьировать как во время проводимых испытаний, так и при последующей обработке их результатов.

Кластерный анализ дает возможность статистической обработки временных последовательностей групп событий АЭ и сравнения параметров этих групп с соответствующими эталонами. Такая обработка данных не требует исследования формы сигнала АЭ и его спектральных характеристик, что существенно ускоряет оценку и прогнозирование состояния материала, которые происходят в реальном времени практически мгновенно после набора необходимого для оценки количества событий АЭ.

В то же время большинство других исследователей сосредоточились на анализе осциллограмм и спектральных характеристик конкретных сигналов АЭ, что требует значительно более сложной и медленной обработки больших массивов информации. При этом используют нейронные сети, быстрое преобразование Фурье, Вейвлет-анализ и т. д. Результаты такой обработки дают в итоге мало информации о состоянии материала, поскольку:

– исходный сигнал, излучаемый дефектом, существенно искажается на пути к датчику за счет многочисленных переотражений и потери части спектра;

– полученный датчиком сигнал искажается самим датчиком, взаимодействуя с принимающей его контактной частью, обычно – пьезоэлектрическим элементом;

– сигнал АЭ, преобразованный датчиком в электрический, накладывается на постоянно имеющийся электрический фон, при этом часть спектра урезается самим датчиком;

– в зависимости от частоты дискретизации при оцифровке, часть сигнала теряется, поскольку АЭ является процессом с очень высокой частотой осцилляций.

В связи с этим, в системах ЕМА обработка данных не базируется на анализе осциллограмм, несмотря на возможность их получения. Определение опасности состояния материала выполняется на основе сравнения полученных данных с эталонами.

Прогноз разрушающей нагрузки [12] также основан на анализе эталонов и фактически происходит в едином алгоритмическом блоке с определением степени опасности. Найдя подходящий эталон или построив новый путем самообучения, соответствующий алгоритм определяет, на какой стадии развития разрушения находится материал. Отметим, что для прогноза разрушающей нагрузки требуется знать текущую, поскольку нагрузка является одним из основных параметров ВСМ, входящих, помимо данных АЭ, в эталоны. Преимущества эталонов перед, например, нейронными сетями, заключаются, прежде всего, в том, что обработка происходит на небольших массивах данных и не требует предварительной тренировки. Вероятность прогноза 0,95 при допустимой погрешности ± 15 % достигается тем, что эталоны были получены на основе многочисленных испытаний образцов и результатов математического моделирования, а затем осуществлен выбор наиболее подходящих из них. После закладки эталонов в программные алгоритмы была выполнена проверка работы прогноза на большом числе образцов и некоторых конструкциях, в частности, доводимых до разрушения [8]. Прогноз разрушения, выполняемый системами ЕМА, официально утвержден УкрЦСМ в виде методики государственной метрологической аттестации.

Наиболее интересными представляются результаты испытаний образцов, которые были вос-

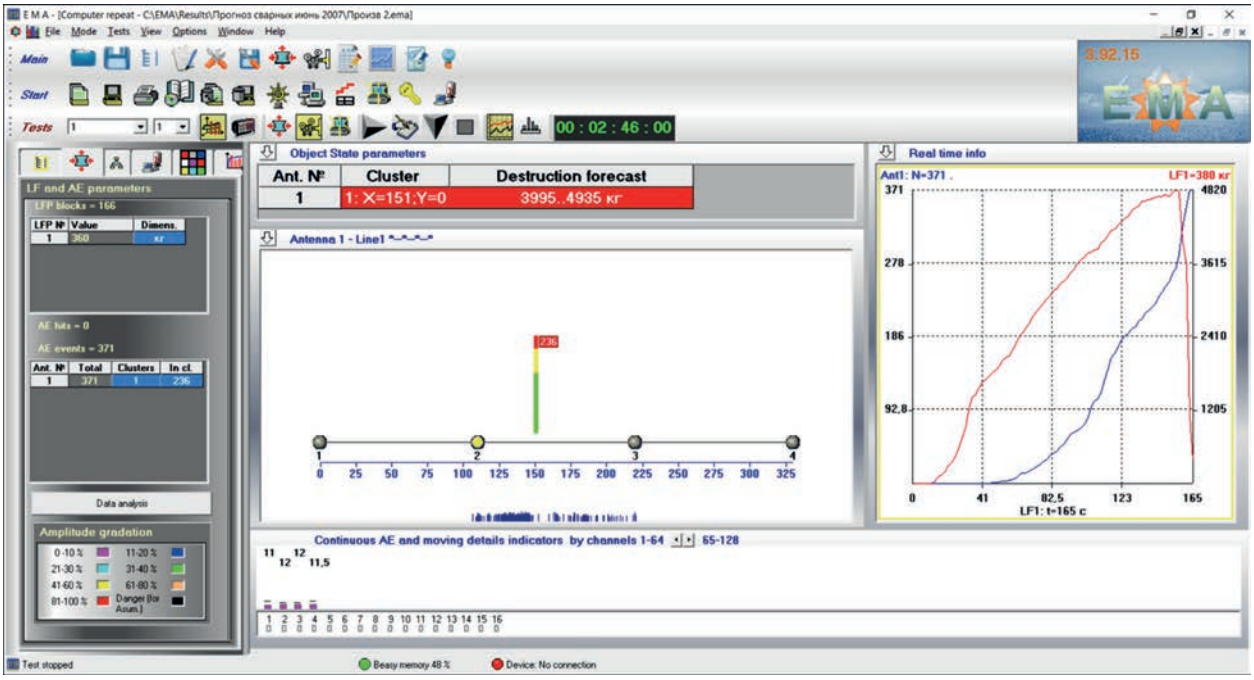


Рис. 2. Окно испытаний программы ЕМА-3.9 с отображением результатов испытания образца № 2

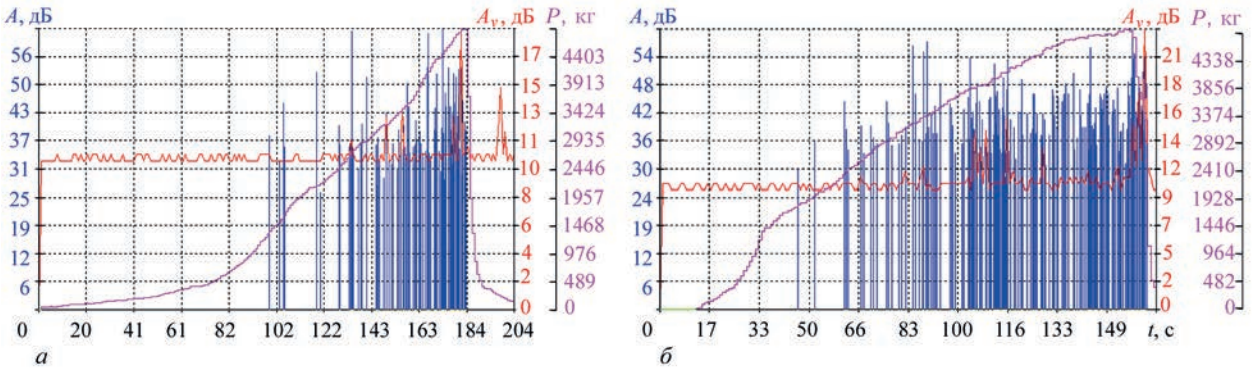


Рис. 3. Результаты испытания образцов № 1 (*а*) и № 2 (*б*)

созданы путем сварки частей уже разрушенных образцов, причем металл, из которого они изготовлены, не был известен, и качество сварки не контролировали. После разрушения эксперимент повторяли. Такие испытания позволяли полностью исключить вмешательство экспериментатора в подбор параметров прогноза и убедиться, что метод прогнозирования будет работать при заранее неизвестной прочности материала.

На рис. 2, 3 представлены результаты испытаний двух таких образцов. Локационная антенна состояла из 4-х датчиков АЭ, расположенных на плоском образце с равной базой 110 мм. Показано окно программы ЕМА с результатами прогноза разрушения образца № 2 и графики непрерывной и дискретной АЭ с наложенной нагрузкой для обоих испытаний. Видно, что число зарегистрированных событий АЭ, их распределение во времени, непрерывная АЭ и характер изменения нагрузки для разных образцов совершенно отличаются. Тем не менее, прогноз в обоих случаях получен с необходимой точностью.

Для образца № 1 прогноз разрушения дал нагрузку в диапазоне от 4400 до 5560 кг. Разрушение произошло при максимальной нагрузке 4892 кг. Для образца № 2 соответствующий диапазон прогноза разрушения составил от 3995 до 4935 кг. Разрушение произошло при максимальной нагрузке 4820 кг. В обоих случаях погрешность укладывается в необходимый диапазон ± 15% согласно сертификату системы.

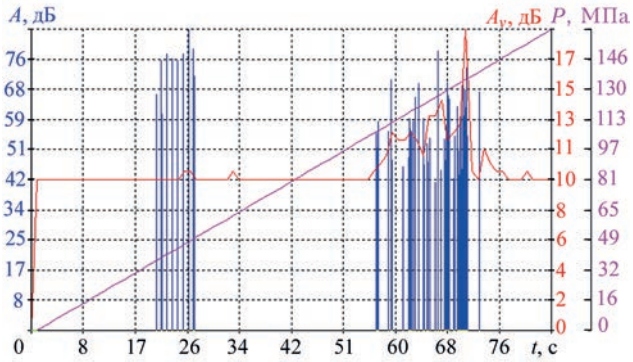


Рис. 4. Результаты испытания образца из композитного материала с концентраторами

На рис. 2 над экраном локации показана область прогноза разрушения. Слева – таблицы АЭ и НЧ данных, справа – график реального времени, отображающий нагрузку и суммарное число событий АЭ. Под экраном локации – значение непрерывной эмиссии по каждому измерительному каналу (показано столбиками).

На рис. 3 показаны следующие параметры испытаний образцов № 1 и № 2 в зависимости от времени: амплитуда АЭ (*A*, дБ – столбчатый график), непрерывная АЭ (A_v, дБ – линейный график), нагрузка (*P*, кг – линейный график).

Как видим, независимо от характера АЭ и различного темпа роста нагрузки, прогноз разрушения выполняется с необходимой точностью. Очень важным представляется получение прогноза разрушения для материалов с низкой акустической активностью. Это относится, в частности, к композитным материалам, применение которых в последнее время становится все более широким. Рассмотрим прогноз разрушения композитного материала Udo UD CST 150/300 на основе связующего ARALDITE 564, испытания которого описаны в работе [13]. Нагрузка в процессе испытания не записывалась, но ее можно внести в результаты эксперимента, зная табличный предел прочности материала 162 МПа и то, что кривая нагружения, как и полагается для хрупкого материала, должна иметь линейный характер. Проведя такой виртуальный эксперимент для образца с высверленными круговыми концентраторами, получили график, представленный на рис. 4. Параметры на графиках в зависимости от времени: амплитуда АЭ (*A*, дБ – столбчатый график), непрерывная АЭ (A_v, дБ – линейный график), нагрузка (*P*, МПа – линейный график).

Прогноз разрушения был получен на 62-й секунде при 2-м уровне предупреждения об опасности и составил от 152 до 176 МПа. Считая, что разрушение произошло при максимальной нагрузке 162 МПа, видим, что и в данном случае погрешность укладывается в необходимый диапазон ± 15 %.

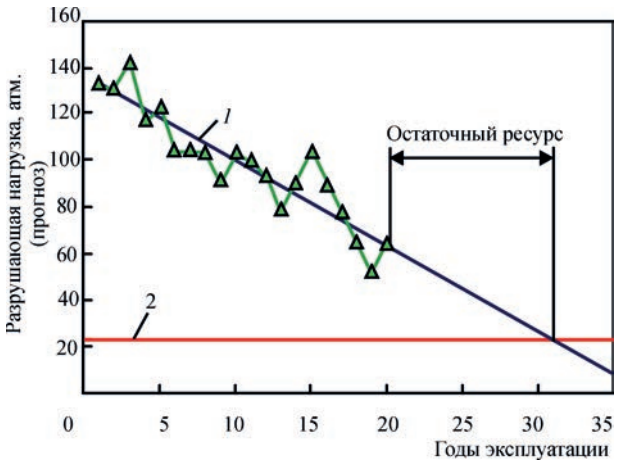


Рис. 5. Условная схема оценки остаточного ресурса (–▲– – разрушающая нагрузка, атм.; *1*, *2* – см. описание в тексте)

Данный эксперимент интересен и тем, что сразу получен предел прочности материала, поскольку в качестве параметра нагружения использованы напряжения. Для тех случаев, когда прогнозируется разрушающий параметр нагружения, выраженный в килограммах, уровень жидкости в миллиметрах или рабочее давление в трубе в МПа, несложно выполнить пересчет этих параметров в напряжения и получить в результате прогнозный предел прочности материала. В случае же длительной эксплуатации имеется возможность оценить по этим данным предел длительной прочности [14]. Исследование работоспособности предлагаемой методики определения длительной прочности проводили при контроле трубопроводов горячего промежуточного перегрева пара. Материалы трубопроводов – сталь 15Х1М1Ф, диаметр трубы 630 мм с толщиной стенки 25 мм и сталь 12Х1МФ, труба диаметром 377 мм с толщиной стенки 17 мм. АЭ датчики устанавливали на трубе на расстояние 20 м друг от друга. Контроль выполнялся при давлении пара в трубе, равном 22 атм., температура пара 542 °С. Значения прогнозируемого разрушающего давления, пересчитанные в напряжения, удовлетворительно соответствуют значениям предела длительной прочности сталей 15Х1М1Ф и 12Х1МФ, полученным для этих материалов при стандартных испытаниях образцов на длительную прочность.

Высокая достоверность прогноза разрушения позволяет перейти к оценке остаточного ресурса эксплуатирующихся конструкций. В частности, зная предел длительной прочности материалов и разрушающую нагрузку в каждый момент времени эксплуатации конструкции, можно оценить остаточный ресурс материала.

На рис. 5 представлена простейшая условная схема определения ресурса по изменению с течением времени прогнозной разрушающей нагрузки материала конструкции. График позволяет приближенно оценить время до пересечения линии экстраполяции этих данных (*1*) с линией (*2*), представляющей рабочую нагрузку. Пересечение этих линий укажет на время разрушения материала. Назначив определенный запас по времени, можно определить допустимый остаточный ресурс мате-

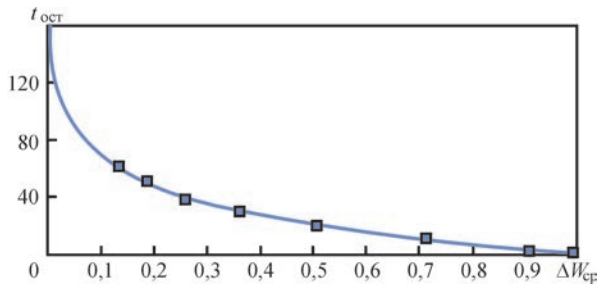


Рис. 6. Номограмма для определения остаточного ресурса по известной поврежденности

риала, и, следовательно, время вывода конструкции из эксплуатации.

Указанный метод оценки ресурса является далеко не единственным. В 2010 г. авторами работы [15], на основании анализа исследований несколькими методами, включая АЭ, весьма большого числа образцов с различной эксплуатационной наработкой (до 48 лет на момент контроля), предложена методика оценки остаточного ресурса. Оказалось, что поврежденность исследуемых материалов, определенная различными физическими методами, имеет четкую зависимость от эксплуатационной наработки, которая может быть описана простыми уравнениями. В частности, зависимость от наработки поврежденности $\Delta W_{ср} = ae^{bt}$, где t – срок эксплуатации; a = 0,1352; b = 0,0333. На основании этих данных предложена номограмма (рис. 6) для определения ресурса по известной поврежденности материала. Для того, чтобы убедиться в ее работоспособности, выполнили сравнение остаточного ресурса, полученного таким образом по данным поврежденности, определенной на основе результатов АЭ испытаний, АЭ сканирования, измерения ударной вязкости и рассеяния твердости.

Существуют и другие методы оценки ресурса, такие как использование диаграмм Веллера при циклическом нагружении, однако, большая часть из них ориентирована на математический расчет с известными и постоянными параметрами цикла. В случае несистематического изменения нагрузок, периодических остановов эксплуатации объектов контроля, такой расчет выполнить проблематично. В связи с этим, при разработке ПО для оценки ресурса хранилищ аммиака на ОПЗ был применен комбинированный метод (рис. 7). Ресурс постоянно рассчитывается двумя способами – по изменению прогноза разрушающей нагрузки и по номограмме, представленной на рис. 6. Из двух вариантов расчета выбирается наихудший и выводится в соответствующую информационную строку.

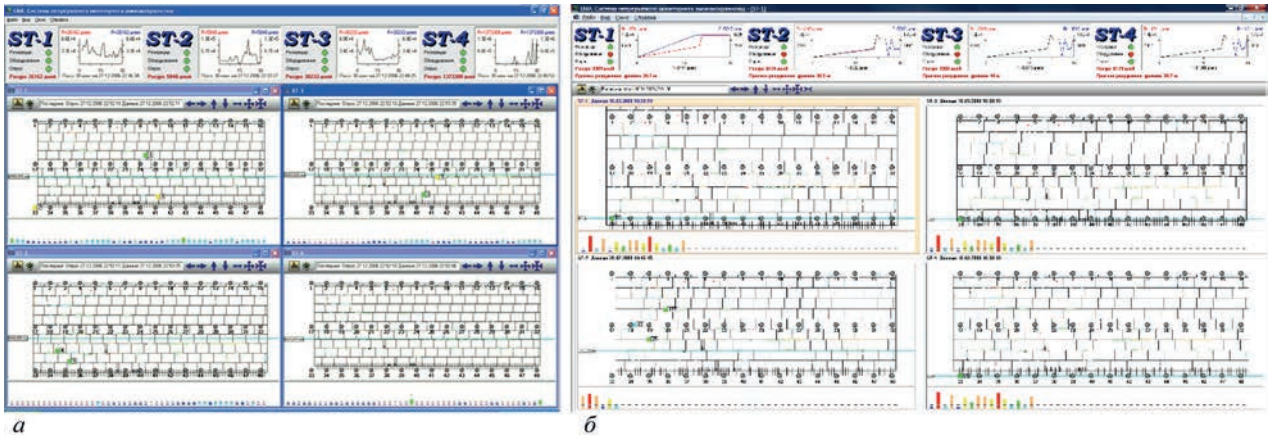
Отметим, что прогноз ресурса не следует путать с самим ресурсом конструкции. Реальный ресурс конструкции неизвестен, он всегда снижается и становится известным только после разрушения. Прогнозный ресурс может как снижаться, так и повышаться, в зависимости от улучшения или ухудшения условий эксплуатации конструкции и выбранного метода расчета. В связи с этим прогноз ресурса, в отличие от прогноза разрушающей нагрузки, нормировать невозможно. Прогноз разрушающей нагрузки легко проверяется на образцах, сделать такую проверку для ресурса нельзя (за исключением, как уже было сказано, равномерного циклического нагружения с постоянными параметрами цикла).

Однако несмотря на оценочный характер прогнозного ресурса, отслеживание тенденций его изменения чрезвычайно важно для понимания текущего состояния конструкции. Это еще раз показывает необходимость непрерывного мониторинга потенциально опасных конструкций с оценкой их состояния в реальном времени.

Использование параметров ВСМ при анализе АЭ позволяет выделить из общей энергии разрушения часть, связанную с образованием повреждений, что может существенно уточнить расчеты на прочность и оценить состояние материала в каждый момент времени его эксплуатации под нагрузкой. Теоретическое обоснование данной возможности и подтверждение ее при испытании образцов представлены в работе [16]. Хотя величина энергии, связанная с образованием повреждений в материалах при разрушении, незначительна по сравнению с общей энергией разрушения, она достаточно точно и надежно фиксируется методом АЭ и можно считать вполне допустимым ее использование при определении разрушающей нагрузки материалов. Перспективной представляется автоматизация таких расчетов при дальнейшем совершенствовании АЭ систем.

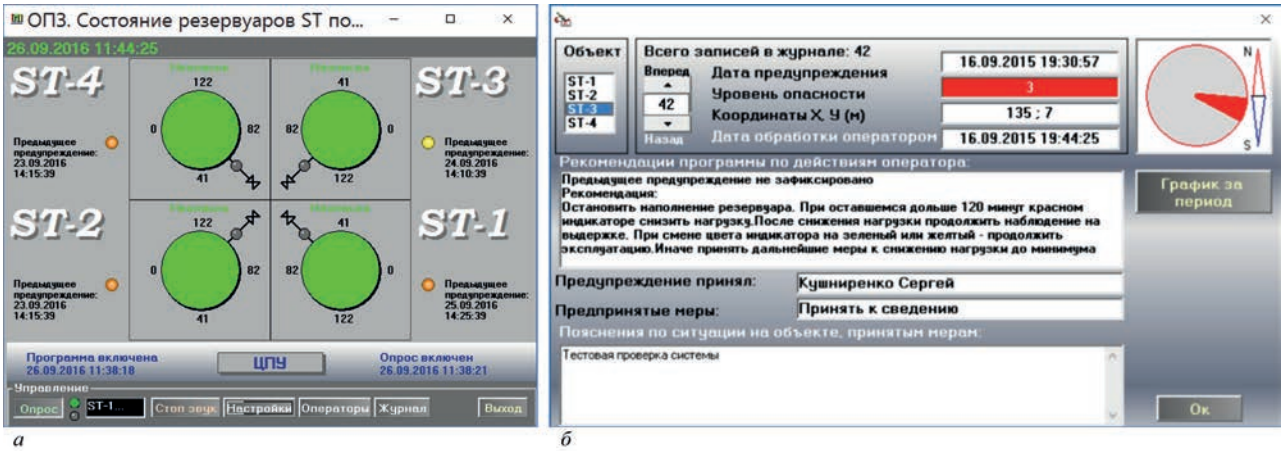
Вопрос максимальной автоматизации при создании и модернизации АЭ систем ЕМА 3-го и 4-го поколений занимал и занимает одно из ключевых мест. В настоящее время системы непрерывного мониторинга после первоначальной настройки под параметры конкретного объекта работают полностью автоматически, без вмешательства оператора. Специальные программные и аппаратные средства обеспечивают защиту от зависания, перезагрузку и автоматический запуск после отключения электропитания, звуковую и цветовую индикацию в случае возникновения опасности, сгенерированные на основе анализа ситуации рекомендации по дальнейшим режимам эксплуатации объектов мониторинга, долговременный статистический анализ возникновения опасных ситуаций и проблемных участков эксплуатируемых конструкций.

Все сказанное выше позволяет на базе уже существующих и вновь создаваемых систем непрерывного мониторинга внедрить технологию управления эксплуатационными параметрами конструкций и оборудования с целью обеспечения их надежной работы [17]. Для реализации такой технологии требуется организовать обратную связь между мониторинговым оборудованием и системой управления эксплуатацией конструкции. Такая схема работы позволит существенно повысить уровень безопасности эксплуатации конструкций и снизить потенциальную возможность аварий. Сегодня в этом направлении впервые созданы программы и алгоритмы, реализующие автоматически создаваемую рекомендацию



а *б*

Рис. 7. Первоначальный (*а*) и обновленный (*б*) варианты окна программы–интегратора с информацией о ресурсе, выводимой для каждого хранилища аммиака отдельно в верхней части окна (в обновленном варианте помимо ресурса указано также прогнозное значение разрушающей нагрузки в виде допустимого уровня наполнения резервуара)



а *б*

Рис. 8. Интерфейс пользователя индикаторной программы для операторов при контроле состояния хранилищ жидкого аммиака ОПЗ: окно с индикаторами опасности состояния (*а*); окно журнала, включающее информацию об обработке предупреждений оператором (*б*). Показывает выданную для данного предупреждения рекомендацию «Нормированный интеллектуальный совет»

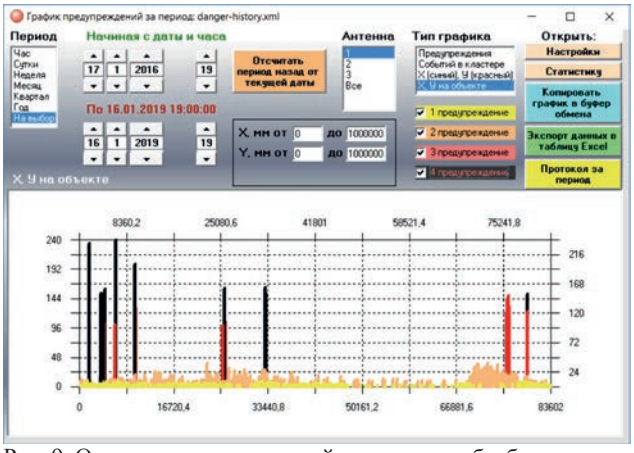


Рис. 9. Окно модернизированной программы обработки статистики предупреждений с графиком предупреждений об опасности за 3 года, показанных относительно длины трубопровода

для оператора по сложившейся ситуации – так называемый Нормированный интеллектуальный совет (НИС). Совет формируется на основе анализа не только текущих, но и предшествующих данных о состоянии объекта контроля и учитывает многолетний опыт эксплуатации объектов данного типа и контроля их системами непрерывного АЭ мониторинга. НИС внедрен на практике в рамках системы контроля цеха перегрузки аммиака ОПЗ и предусматривает обратную связь с действиями оператора, а также ведение журнала предупреждений об опасности и предпринятых мерах. Программы, реализующие НИС и взаимодействие с оператором, прошли несколько этапов модернизации, с учетом рекомендаций персонала предприятия (рис. 8), и были дополнены средствами статистического анализа предупреждений (рис. 9) [18].

Отметим в заключение важность авторского надзора за работой систем мониторинга, прежде всего при помощи удаленного доступа по Интернету. Практика показала, что параллельный контроль процесса эксплуатации мониторинговых систем специалистами ИЭС им. Е.О. Патона НАН Украины позволяет эксплуатирующему предприятию быть уверенным в правильности работы системы и оптимальности настроек процесса мониторинга, обеспечении своевременного и максимально полного анализа данных и оперативного реагирования на внештатные ситуации.

Авторский надзор, выполняемый в течение многих лет за системами непрерывного мониторинга

на различных предприятиях Украины, позволил также усовершенствовать ряд аспектов работы систем мониторинга и расширить их возможности. Статистическая информация о состоянии конструкций, получаемая в течение многих лет посредством Интернета, является чрезвычайно важной как с научной, так и с практической точки зрения, предоставляя знания, которые невозможно было бы получить другим способом.

Выводы

1. Описанная и предлагаемая к применению АЭ технология и аппаратура семейства ЕМА в состоянии решать практически все вопросы, связанные с обеспечением безопасности конструкций и управлением процессом эксплуатации с точки зрения безопасности, поскольку обеспечивают: автоматизированную оценку риска; онлайн прогнозируют разрушающую нагрузку и остаточный ресурс конструкций; полностью автоматизированные мониторинг и прогнозирование; автоматизированное управление безопасностью конструкции; простую инсталляцию и интеграцию в промышленные компьютерные сети; использование стандартных сетевых протоколов и технологий; сокращение простоя производства; снижение числа плановых остановов; предотвращение аварий; сокращение времени контроля; сокращение времени и расходов на пуск после испытания или ремонта; снижение расходов на оплату процедуры контроля; снижение расходов на принятие решения о состоянии конструкции; упрощение работы контролирующего персонала; снижение расходов на диагностическое оборудование; унификацию процедуры контроля для всего производства; снижение затрат на замену оборудования и ПО за счет унификации обмена данными; снижение расходов на обучение специалистов.

2. Успешно пройдены все этапы развития и адаптации базового варианта технологии для промышленных сооружений. Реализация выполнена на некоторых крупных предприятиях Украины. Предполагаемое развитие технологии: расширение применения на различные классы материалов, конструкций и условия эксплуатации.

3. Для расширения возможностей технологии и аппаратуры необходимы соответствующие алгоритмы, программы и нормативная база.

Список литературы

1. (2009) ГОСТ 27518-87. *Диагностирование изделий. Общие требования*. Действующий от 1989–01–01. Москва, Стандартинформ.
2. (2009) ГОСТ 20911-89. *Техническая диагностика. Термины и определения*. Действующий от 1991–01–01. Москва, Стандартинформ.
3. Варовин А.Я., Карзов Ю.Я., Марголин Б.З. (2006) Проблемы прогнозирования работоспособности конструкций по данным НК. *В мире неразрушающего контроля,* **4**(34), 6–11.
4. (2015) 68-я ежегодная ассамблея международного института сварки IIW-2015. Хельсинки. Финляндия. *Техническая диагностика и неразрушающий контроль*, **4**, 58.
5. Патон Б.Е., Лобанов Л.М., Недосека А.Я. и др. (2012) *Акустическая эмиссия и ресурс конструкций: альбом.* Киев, Индпром.
6. Недосека А.Я. (2008) *Основы расчета и диагностики сварных конструкций.* 4-е изд. Патон Б.Е. (ред.). Киев, Индпром.
7. Патон Б.Е., Кудрявцев И.В., Недосека А.Я. Коротынский А.Е. (1974) О некоторых путях построения автоматических информационно-измерительных систем для диагностики надежности сварных конструкций. *Автоматическая сварка*, **9**, 1–5.
8. Недосека А.Я., Недосека С.А., Овсиенко М.А. и др. (2016) Испытание сосудов давления международной группой специалистов. *Техническая диагностика и неразрушающий контроль*, **3**, 3–10.
9. Недосека С.А., Недосека А.Я. (2005) Диагностические системы семейства «ЕМА». Основные принципы и особенности архитектуры (Обзор). *Там же*, **3**, 20–26.
10. Недосека С.А., Недосека А.Я, Овсиенко М.А. (2011) Влияние методов обработки акустико-эмиссионной информации на формирование АЭ событий и определение их координат. *Там же*, **2**, 5–14.
11. Недосека С.А., Овсиенко М.А. (2012) Особенности обработки данных акустической эмиссии для сложных и множественных локационных антенн. *Там же,* 2, 7–12.
12. Недосека С.А. (2007) Прогноз разрушения по данным акустической эмиссии. *Там же*, **2**, 3–9.
13. Недосека С.А., Недосека А.Я., Шевцова М.А. (2018) Акустическая эмиссия при испытании композитных материалов. *Там же*, **4**, 32–36.
14. Недосека А.Я., Недосека С.А., Смоголь Ю.А., Козаков А.А. (2014) Длительная прочность материалов, работающих при высоких температурах, по данным акустической эмиссии. *Там же*, **4**, 17–21.
15. Недосека С.А., Недосека А.Я. (2010) Комплексная оценка поврежденности и остаточного ресурса металлов с эксплуатационной наработкой. *Там же*, **1**, 9–16.
16. Недосека А.Я., Недосека С.А. (2018) Оценка энергии, расходуемой на образование повреждений при разрушении материалов, на основе данных акустической эмиссии. *Там же*, **4**, 19–23.
17. Недосека А.Я., Недосека С.А., Яременко М.А. (2014) Об управлении безопасностью эксплуатации оборудования, несущего рабочую нагрузку. Непрерывный акустико-эмиссионный мониторинг. *Хімічна промисловість України*, **1**, 10–21.
18. Патон Б.Е., Лобанов Л.М., Недосека А.Я. и др. (2016) Интеллектуальные технологии в оценке состояния конструкций (АЭ технология и контролирующая аппаратура нового поколения на ее основе) *Техническая диагностика и неразрушающий контроль*, **2**, 3–18.

References

1. (2009) GOST 27518-87: *Diagnostics of items. General requirements*. Valid from 1989-01-01. Moscow, Standartinform [in Russian].
2. (2009) GOST 20911-89: *Technical diagnostics. Terms and definitions*. Valid from 1991-01-01. Moscow, Standartinform [in Russian].
3. Varovin, A.Ya., Karzov, Yu.Ya., Margolin, B.Z. (2006) Problems of prediction of structure serviceability by NDT data. *V Mire Nerazrushayushchego Kontrolya*, **4**(34), 6–11 [in Russian].
4. (2015) 68th Annual Assembly of the International Institute of Welding IIW 2015. *Tekh. Diagnost. i Nerazrush. Kontrol*, **4**, 58 [in Russian].
5. Paton, B.E., Lobanov, L.M., Nedoseka, A.Ya. et al. (2012) *Acoustic emission and residual life of structures: Album*. Kiev, Indprom [in Russian].

6. Nedoseka, A.Ya. (2008) *Fundamentals of design and diagnostics of welded structures*. Ed. by B.E. Paton, 4th Ed. Kiev, Indprom [in Russian].
7. Paton, B.E., Kudryavtsev, I.V., Nedoseka, A.Ya., Korotynsky, A.E. (1974) On some methods of construction of automatic information-measuring systems for diagnostics of welded structure reliability. *Avtomatich. Svarka*, **9**, 1–5 [in Russian].
8. Nedoseka, A.Ya., Nedoseka, S.A., Ovsienko, M.A. et al. (2016) Testing of pressure vessels by an international expert team. *Tekh. Diagnost. i Nerazrush. Kontrol*, **3**, 3-10 [in Russian].
9. Nedoseka, S.A., Nedoseka, A.Ya. (2005) Diagnostic systems of EMA family. Main principles and architectural features (Review). *Ibid.*, **3**, 20–26 [in Russian].
10. Nedoseka, S.A., Nedoseka, A.Ya., Ovsienko, M.A. (2011) Influence of methods of acoustic-emission data treatment on formation of AE events and determination of their coordinates. *Ibid.*, **2**, 5–14 [in Russian].
11. Nedoseka, S.A., Ovsienko, M.A. (2012) Features of processing acoustic emission data at application of complex and multiple location arrays. *Ibid.*, **2**, 7–12 [in Russian].
12. Nedoseka, S.A. (2007) Forecasting the fracture by the data of acoustic emission. *Ibid.*, **2**, 3–9 [in Russian].
13. Nedoseka, S.A., Nedoseka, A.Ya., Shevtsova, M.A. (2018) Acoustic emission in testing of composite materials. *Ibid.*, **4**, 32–36 [in Russian].
14. Nedoseka, A.Ya., Nedoseka, S.A., Smogol, Yu.A., Kozakov, A.A. (2014) Long-term strength of materials operating at high temperatures, based on acoustic emission data. *Ibid.*, **4**, 17–21 [in Russian].
15. Nedoseka, S.A., Nedoseka, A.Ya. (2010) Integrated assessment of damage level and residual life of metals with certain operating life. *Ibid.*, **1**, 9–16 [in Russian].
16. Nedoseka, A.Ya., Nedoseka, S.A. (2018) Evaluation of energy consumed in damage initiation at fracture of materials, based on acoustic emission data. *Ibid.*, **4**, 19-23 [in Russian].
17. Nedoseka, A.Ya., Nedoseka, S.A., Yaremenko, M.A. (2014) On management of operational safety of equipment under working load. Continuous acoustic-emission monitoring. *Khimichna Promyslovist Ukrainy*, **1**, 10–21 [in Russian].
18. Paton, B.E., Lobanov, L.M., Nedoseka, A.Ya. et al. (2016) Smart technologies for evaluation of structure state (AE technologies and new generation control equipment on its basis). *Tekh. Diagnost. i Nerazrush. Kontrol*, **2**, 3-18 [in Russian].

ОСОБЛИВОСТІ АЕ ДІАГНОСТИКИ. ТЕХНОЛОГІЯ, АПАРАТУРА ТА АЛГОРИТМИ

С.А. Недосєка, А.Я. Недосєка, М.А. Яременко, М.А. Овсієнко, О.І. Бойчук, І.Г. Волошкевич

ІЕЗ ім. Є.О. Патона НАН України. 03150, м. Київ, вул. Казимира Малевича, 11.

E-mail: office@paton.kiev.ua

Сформульовано основні вимоги до діагностування конструкцій в процесі експлуатації. Поетапно розглянуто отримання інформації, яку повинні видавати моніторингові системи після обробки даних, які надійшли з об’єкту. Показано, що розроблена спільно з угорськими фахівцями система безперервного моніторингу конструкцій дозволяє оцінювати та прогнозувати їх стан як в процесі короткочасних випробувань, так і в процесі експлуатації. Система в змозі вирішувати практично всі основні питання, пов’язані із забезпеченням безпеки конструкцій при експлуатації. Бібліогр. 18, рис. 9.

Ключові слова: діагностування конструкцій, акустична емісія, моніторингові системи, оцінка технічного стану конструкцій

FEATURES OF AE DIAGNOSTICS. TECHNOLOGY, INSTRUMENTATION AND ALGORITHMS

S.A. Nedoseka, A.Ya. Nedoseka, M.A. Yaremenko, M.A. Ovsienko, O.I. Boichuk, I.G. Voloshkevich

E.O.Paton Electric Welding Institute of the NAS of Ukraine. 11 Kazimir Malevich Str., 03150, Kyiv, Ukraine.

E-mail: office @paton.kiev.ua

The main requirements to diagnostics of structures in operation were formulated. Obtaining the information which should be provided by monitoring systems after processing of initially received data, is considered step by step. It is shown that the system of continuous monitoring of structures developed together with Hungarian specialists, allows evaluation and prediction of the structure state, both during short-term testing and in operation. The system is capable of solving practically all the main questions, related to ensuring the operational safety of structures. 18 Ref., 9 Fig.

Keywords: diagnostics of structures, acoustic emission, monitoring systems, evaluation of the state of structures

Поступила в редакцию
18.01.2019

Fronius

ООО «Фрониус Украина» проводит семинары:

15 мая 2019 г. — «Автоматизация сварочных процессов»
20 июня 2019 г. — «Роботизация сварочных процессов»

Контакты: тел.: +38 044 277-21-41; факс: +38 044 277-21-44
E-mail: sales.ukraine@fronius.com
www.fronius.ua