



ОБ ОЦЕНКЕ НАДЕЖНОСТИ ЭКСПЛУАТИРУЮЩИХСЯ КОНСТРУКЦИЙ

(состояние вопроса и перспектива развития)

А. Я. НЕДОСЕКА, С. А. НЕДОСЕКА

Рассмотрены основные методы оценки состояния материалов конструкций в условиях эксплуатации. Приведены сведения о возможностях различных методов контроля. Рассматривается метод, позволяющий на основе данных акустической эмиссии прогнозировать разрушающую нагрузку и остаточный ресурс конструкций в обычных условиях эксплуатации.

The paper deals with the main methods of assessment of the condition of structure materials under operation conditions. Data on the capabilities of various control methods are given. A method is considered, which allows prediction of the breaking load and residual life of structures under regular operation conditions.

Практика эксплуатации машин, конструкций и сооружений все настойчивее требует создания методов и средств, с помощью которых можно было бы определять их функциональные возможности в любой момент времени как в прошлом, так и в настоящем, а также уметь на базе этих данных получать информацию об их состоянии и поведении в будущем.

Обеспечение безопасности конструкции начинается задолго до пуска ее в эксплуатацию. На *первой стадии* проводятся расчеты, предварительные испытания, проектно-конструкторские и другие работы, связанные с созданием конструкции. Нужно отметить, что прочность объектов, как правило, хорошо обеспечена еще на стадии их проектирования. Проведены расчеты, выбран материал, даны соответствующие запасы, просчитан ресурс конструкции или, что точнее, обеспечен заданный сроком службы ресурс. Однако длительная эксплуатация изделия, нарушение технологии производства и ремонтных работ приводят к необратимым процессам прежде всего в материале, особенно в зонах технологического воздействия, где прочностные свойства нарушаются еще на стадии изготовления. Именно отклонения свойств и структуры материалов конструкции от принятых при расчетах несут основную ответственность за дальнейшую эксплуатацию, причем скорость нарастания таких негативных изменений в материале является решающим фактором. И лишь на *второй стадии* — стадии эксплуатации — начинают проводить мероприятия по контролю ее состояния, оценке ее поврежденности и определению реального остаточного ресурса. На второй стадии, которая наступает после введения конструкции в эксплуатацию, существенную долю неопределенности в фактическое состояние конструкции могут внести случайные просчеты в конструктивных

решениях, нарушения технологии изготовления и эксплуатации, внешняя среда и собственно время эксплуатации. В результате, как уже было сказано, в отдельных локальных областях суммарный объем повреждений может достигнуть критической величины и может начаться разрушение.

Поэтому при разработке мер безопасности основное внимание следует уделять организации мероприятий по приведению условий эксплуатации конструкций в соответствие с техническими требованиями, разработке систем, оборудования и нормативных материалов, обеспечивающих поддержание заданных документацией норм и режимов, поиску методов и средств, которые бы анализировали несущую способность материалов и своевременно предупреждали о ее исчерпании.

Можно отметить, что в настоящее время наука о прочности материалов располагает следующими тремя группами методов, способными решить проблему обеспечения безопасности конструкций.

Первая группа основана на привлечении общих теорий прочности материалов. Они могут быть использованы лишь в случаях, когда предполагаемая авария может произойти в результате не появления трещин, а ослабления несущего сечения конструкции за счет, например, утонения стенки или изменения механических свойств материалов. Такая методика должна применяться после того, как проверка тем или иным способом показала, что трещин в материале нет.

Вторая группа методов основана на общих законах механики разрушения для материалов с появившимися и прогрессирующими трещинами. Эти методы наиболее общие, однако, трудны в применении, так как требуют обнаружения места и параметров трещины, анализа напряженного состояния в ее окрестности, анализа изменившихся за многолетнюю эксплуатацию механических



свойств материала в районе образовавшегося дефекта.

Группа методов третьего типа может быть условно охарактеризована как группа интегральных методов, которые реагируют лишь на активизацию того или иного дефекта по сопутствующим ему процессам, например, по излучению упругих волн, вызванных перемещением дислокаций, появлением их опасной концентрации в каком-либо месте конструкции, появлением и развитием трещины. Эта группа наиболее перспективна. К ней, прежде всего, следует отнести метод акустической эмиссии (АЭ), достаточно хорошо разработанный и используемый в мировой практике в настоящее время.

Представленное выделение трех групп методов оценки состояния материалов при диагностическом контроле позволяет полностью определить процедуру диагностики и необходимое для этих целей оборудование. При этом на первое место выходит процесс выявления в материалах трещин и им подобных дефектов, их идентификация и оценка. Эта часть диагностических работ является коренным вопросом процедуры оценки состояния конструкций и сооружений, особенно тех, которые длительное время находились в эксплуатации, она оказывает решающее влияние на всю дальнейшую процедуру контроля¹.

При изготовлении конструкций доминирующим технологическим процессом является сварка. Умело подобранная технология сварки позволяет создавать прочные и надежные сварные конструкции, работающие без аварий в течение длительного периода времени. Об этом свидетельствует вся отечественная и мировая практика создания сварных конструкций.

В то же время неумелое применение сварки или осуществление ремонтных работ на ее основе может привести к серьезным последствиями, особенно спустя некоторое время после ввода конструкции в эксплуатацию. Сварка имеет ряд особенностей, которые необходимо учитывать при ее применении.

В зоне высоких температур, вызванных сваркой, происходят физико-химические превращения. Картина усложняется тем, что в это же время в материале протекают интенсивные пластические деформации из-за неравномерности его нагрева. Пластические деформации, усадка сварного шва вызывают существенные поперечные укорочения. Постепенное в процессе охлаждения формирование поля остаточных напряжений и физико-химические процессы, протекающие в материале в это же время, могут привести к появлению

трещин. Трещины могут появиться и в процессе выполнения сварного шва, когда соотношение между прочностными свойствами материала и достаточно высокими растягивающими остаточными напряжениями может стать неблагоприятным.

Существенным воздействием остаточных сварочных напряжений на работоспособность конструкций является понижение коррозионной стойкости материалов. Растягивающие напряжения способствуют движению и концентрации вредных примесей, понижающих сопротивление материала действию знакопеременных нагрузок и нагрузок, действующих на конструкцию при низких внешних температурах. Поэтому перед изготовлением конструкции необходима тщательная проработка ее проекта, анализ применяемых для ее изготовления материалов и правильный выбор технологии ее изготовления, учет указанных на схеме явлений с тем, чтобы конструкция отвечала техническим условиям ее эксплуатации и имела достаточно продолжительный ресурс. Однако полностью ликвидировать воздействие сварки на сварное соединение удается не всегда. В первый начальный период эксплуатации конструкции эти недостатки сказываются незначительно. С течением времени в материале происходят необратимые процессы, которые, в конечном счете, могут привести к таким изменениям, которые не учитывать нельзя. На рис. 1 приведен один из механизмов деформационного старения материала, так называемая газовая коррозия, когда отдельные атомы таких газов, как водород или азот, мигрирующих в металле и на его поверхности, проникают в микронесплошности, взаимодействуют с поверхностной энергией несплошностей и превращаются в молекулы, имеющие значительно меньшую подвижность [19]. Срабатывает схема «свободный вход и ограниченный выход». При этом внутреннее давление в несплошности дос-

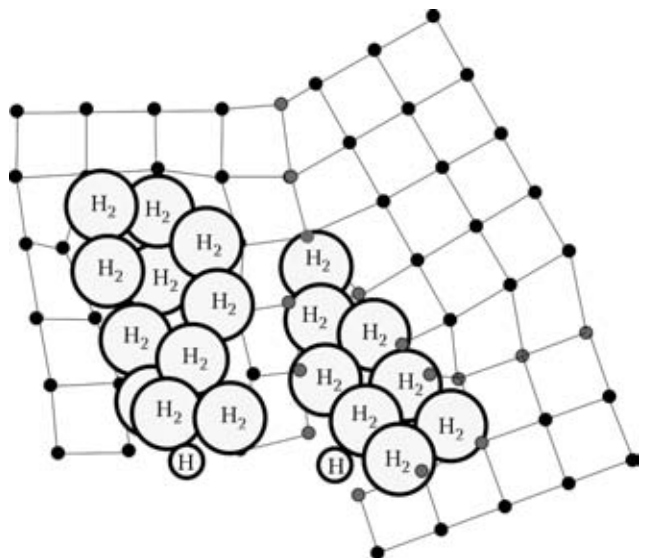


Рис. 1. Накопление водорода в несплошностях

¹ В странах СНГ и в Украине нашел применение метод, основанный на опыте эксплуатации конструкций различных видов. Метод базируется на технологических инструкциях оценки качества конструкции в процессе изготовления и практически не связан с текущей оценкой прочности материала.



тигает громадных величин, приводя к резкому развитию несплошности с таким же резким понижением давления. Далее процесс повторяется и происходит увеличение размеров несплошности. В таких случаях образующаяся и постепенно развивающаяся сеть микротрещин может привести к уменьшению ударной вязкости материала. Это явление хорошо иллюстрирует рис. 2 [5, 9, 18].

Приведенные примеры показывают, что достаточно сложно применять одни и те же подходы к оценкам состояния материалов конструкций, эксплуатирующихся в различных условиях.

Как показывает опыт, существенное влияние на состояние материалов конструкций оказывает обычная коррозия самостоятельно или во взаимодействии с твердыми сыпучими материалами, вызывающими, как правило, ручейковую эрозию стенок труб. Таким образом, оценке возможности нести полезную нагрузку должны подвергаться не только элементы собственно конструкции, но и места, где осуществлялся ее ремонт с применением сварки.

Способы определения состояния материалов конструкций в процессе эксплуатации. К настоящему времени приняты указанные выше три способа оценки состояния материалов конструкций. Первые два по своей сути представляют одно целое и применяются в зависимости от сложившихся обстоятельств. Оба способа базируются на результатах предварительного неразрушающего контроля. Если нет трещин, то расчет ведется с использованием методик, основанных на тех или иных теориях прочности. При наличии трещин методика усложняется и привлекается более сложный расчетный аппарат, базирующийся на механике разрушения (МР).

Каковы трудности, возникающие при использовании этих методов? Первая связана с неполнотой данных НК. В большинстве случаев возможность проконтролировать всю поверхность конструкции отсутствует. Некоторые инструкции предусматривают контроль 20...25 % сварных швов. Естественно, в этих условиях определить наличие дефектов затруднительно, а иногда просто невозможно. В случае применения АЭ, позволяющей получить координаты акустической активности материалов под нагрузкой, можно обнаружить развивающиеся дефекты, хотя это и дает определенный процент ложных показаний, связанных с различными условиями прохождения волны и общей шумовой обстановкой на объекте. При этом контроль можно считать 100%-м и далее проверять показания АЭ обычными методами НК. Однако это не все трудности. Далее для расчетов необходим определенный набор данных не только о найденной трещине, но и о материале конструкции на данный момент времени. Так, автор работы [1] показывает, что для оценки состояния

материала конструкции необходимо получить 34...37 параметров материала. Основные из этих параметров он свел в таблицу. В табл. 1 перечислены 12 основных параметров, необходимых для принятия решения о состоянии конструкции. Измерение и оценка приведенных в табл. 1 параметров представляет достаточно большие трудности. Каждый параметр измеряется с вполне определенной погрешностью, которая, в конечном счете, суммируется. Необходима очень высокая квалификация и большой опыт специалистов, готовящих материал для прочнистов, которые и будут определять возможность дальнейшей эксплуатации контролируемого объекта.

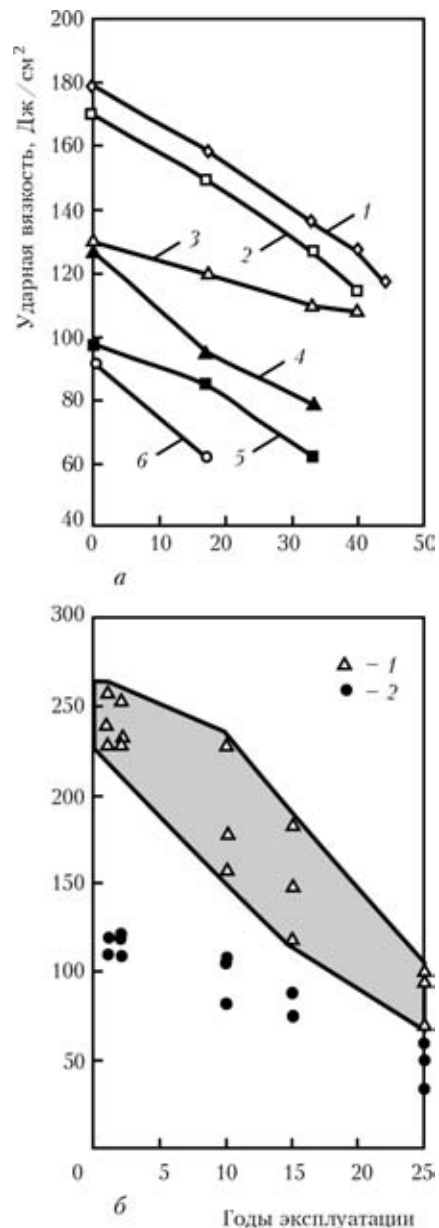


Рис. 2. Изменение ударной вязкости материалов труб газопроводов в Украине (а: 1 — 09Г2С; 2 — Ст.20; 3 — 14ХГС; 4 — 19Г; 5 — 17Г1С; 6 — 17ГС) и в РФ, Уренгой (б: 1 — основной металл; 2 — сварной шов для сталей 09Г2С, 17Г1С, 17Г) в зависимости от времени эксплуатации [18]



Таблица 1. Параметры дефекта и характеристики материала конструкции, необходимые для оценки ее состояния

Данные об исследуемом объекте	
1.1	Тип и габариты сварной конструкции
1.2	Химический состав основного металла и сварного шва
1.3	Характер и величина рабочей нагрузки
1.4	Условия эксплуатации (окружающая среда, температура)
1.5	Действующий срок эксплуатации
Данные о выявленных дефектах	
2.1	Тип дефекта (поверхностный, внутренний, плоскостной, объемный)
2.2	Место расположения (основной металл, шов, зона термического влияния)
2.3	Размеры и глубина залегания от поверхности изделия
2.4	Определение напряженно-деформированного состояния (НДС) в зоне дефекта
Данные о свойствах материала в зоне дефекта	
3.1	Исходные механические свойства и измеренные прибором
3.2	Критерий трещиностойкости (K_{IC} , K_{II}) и предельная пластичность ($\epsilon_{лпрел}$) в зависимости от объемности НДС
3.3	Степень ухудшения (деградации) свойств материалов в процессе эксплуатации

Порядок действий контролеров и расчетчиков, работающих по первому и второму методам, можно представить схемой, показанной на рис. 3. Первая методика такой схемы (1) представляет процедуру, при которой сначала рассчитываются недопустимые дефекты, а затем найденные на объекте дефекты сравнивают с рассчитанными и определяют их опасность.

Другая методика (2) предусматривает полный цикл исследований на объекте с выполнением (например, для внутритрубной диагностики трубопроводного транспорта) работ по шурфованию в потенциально опасных местах, подъем трубы и установка ее на опору для обеспечения удобства дальнейших измерений, проведение УЗК и томографии, затем проводится измерение напряженно-деформированного состояния на поверхности трубы. Следующим этапом определяют механические характеристики материала трубы. По совокупности полученных

результатов проводят оценку состояния материала трубы методами механики разрушения. Двойной линией выделены наиболее сложные и трудоемкие этапы контроля.

Специалисты ЦНИИ КМ «Прометей», работающие в направлении оценок состояния конструкций [4], считают, что очень сложно с достаточной для практических расчетов точностью получить методами НК необходимые исходные данные. Так, авторы работы [4] пишут, что контроль материала конструкции выполнен, получены исходные данные, а прогнозировать его состояние по этим данным нельзя. Другими словами, для проведения расчета прочности конструкции с дефектом зачастую надо знать те параметры дефектов, которые на реальных конструкциях получить чрезвычайно трудно или практически невозможно средствами и методами НК. Далее авторы приходят к выводу, что простейший способ решить вопрос о наличии дефектов — необходимо ждать, пока в процессе эксплуатации они появятся. Естественно, это вынужденное решение, хотя трудно прогнозировать как проявится этот дефект и не поздно ли будет говорить о его развитии. Надо отметить, что сделан достаточно четкий вывод о тех трудностях, которые пытаются преодолеть специалисты в области прочности, используя данные НК. Выбор в этом случае небольшой — комплексная диагностика и контроль с повышением надежности оценки за счет сопоставления различных схем.

Акустическая эмиссия. Раскроем более подробно возможности третьей группы методов — интегральных. Выше мы говорили, что применение простейшей (координатной) аппаратуры на основе АЭ позволяет с достаточной для практики точностью определять координаты АЭ активности материала под нагрузкой. И хотя часть этих координат не соответствует реальным дефектам, все же это большой шаг вперед к 100%-му контролю конструкций, ибо лучше лишний раз проверить место, указанное АЭ аппаратурой, чем пропустить дефект. Опыт работы показывает, что с приме-

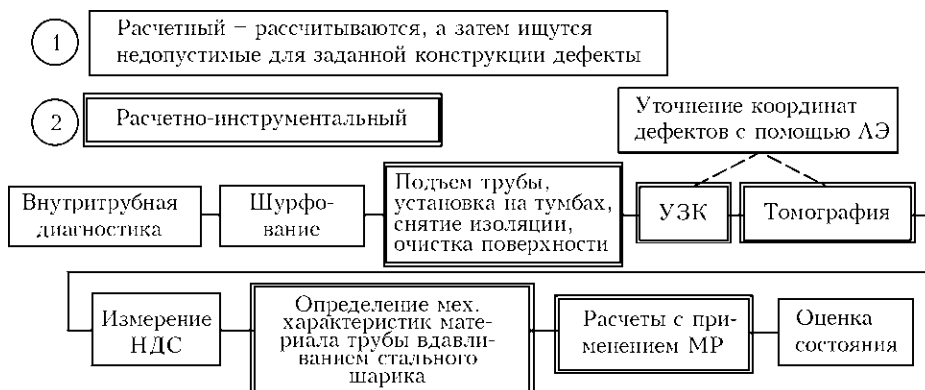


Рис. 3. Методы оценки состояния конструкций на примере трубопроводов



нением АЭ объем работ по контролю уменьшается.

Следует, однако, отметить, что поиск дефектов, указанных АЭ аппаратурой, бывает затруднен из-за отсутствия к ним доступа. Как правило, опасные дефекты появляются в зонах пересечения многих конструктивных элементов, приваренных к главному несущему элементу, или доступ к месту контроля затруднен другими частями конструкции. В этих случаях необходимо местное разрушение конструкции, а это не всегда можно сделать без серьезного ущерба производству.

В то же время к проблеме обеспечения безопасности эксплуатации конструкций можно подойти с другой стороны. Если принять во внимание, что важно знать состояние конструкции, а не причины, приведшие к нему, то аварийную ситуацию, в которой оказалась конструкция, можно оценить более простым способом. Итак, наша задача — определить, в каком состоянии находится конструкция в момент контроля. Анализировать причины, по которым наступило такое состояние — последующая задача специалистов в области прочности, как и разработка мероприятий, необходимых, чтобы не допустить повторения подобной ситуации в будущем.

При таком подходе не обязательно оценивать каждый фактор, представленный в табл. 1, с точки зрения его влияния на прочность материала конструкции. Ведь только неблагоприятное сочетание каких-либо факторов, влияющих на несущую способность материала, приводит к появлению дефекта или развитию существующего. Данная схема хорошо иллюстрируется рис. 4.

Воспользоваться представленной на рис. 4 схемой пытались и пытаются многие исследователи как у нас в стране, так и за рубежом. Так, разработки в области АЭ контроля фирмы «Ниппон

Стил Корпорейшин» в Японии еще в 1972 г. позволили провести АЭ испытания сосуда высокого давления с указанием зон повышенной опасности, на которые необходимо обратить внимание традиционными методами НК [28, 29]. Некоторое время спустя специалисты этой же фирмы разработали систему оценки развивающихся дефектов по степени их опасности. Система оценивает основные параметры АЭ, возникающей в материале при его деформировании. Вначале эти явления классифицируются как группа событий. Затем полученная таким путем группа разбивается на ряд заранее установленных классов в зависимости от интенсивности эмиссии, определяемой по выделенной энергии и количеству всплеск АЭ. Далее система классифицирует характер АЭ группы в зависимости от заранее установленных типов, выбранных по результатам испытания образцов, на которых оценивалась акустическая активность. Степень опасности сигналов определенной группы определяется путем комбинации класса и типа. Представленный подход оценки опасности дефектов применяется на практике при производственных испытаниях крупных сосудов высокого давления и в настоящее время.

Американским обществом инженеров-механиков (ASME) в 1976 г. завершена разработка и опубликован проект стандарта E 569-76 и позднее ASTM E569-02 по испытанию давлением сосудов с применением акустико-эмиссионной аппаратуры. Стандарт, также как и японская система оценки опасности дефектов, предусматривает группирование источников акустических всплеск, возникающих в материале при деформировании, и разделение их по активности на три группы. Тип *A* — неактивный источник, тип *B* — активный (т. е. указывающий на рост дефектов), который необходимо оценить с помощью других методов

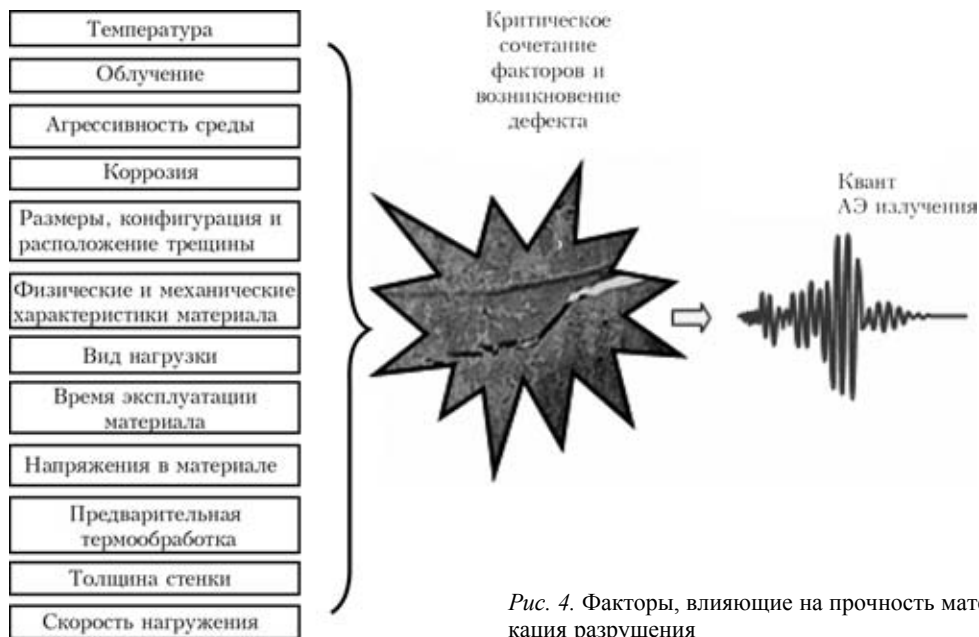


Рис. 4. Факторы, влияющие на прочность материала, и индикация разрушения



НК, тип С — источник с критической активностью (в этом случае испытания необходимо приостановить, источник оценить другими методами контроля).

Описанные работы японских и американских специалистов хорошо иллюстрируют развитие средств акустико-эмиссионного контроля. Из вспомогательных при НК они постепенно превращаются в средства диагностики несущей способности сварных конструкций, хотя неопределенность критериев в оценках авторы рекомендуют «закрывать» дополнительным контролем другими методами и окончательное решение принимать после осуществления такого контроля.

Используя приведенные выше разработки, фирма «Monsanto» (США) создала свою несколько усовершенствованную методику оценки состояния материала конструкций на основе АЭ, используя видимую связь между параметрами АЭ и подвижностью дефекта. Схема принятия решения представляет собой двухкоординатную диаграмму. По оси координат отложена энергия импульсов АЭ, а по оси абсцисс — активность источника. Сочетание активности и интенсивности представляет определенную степень опасности для контролируемого материала. Так, рассмотрено три степени активности источника АЭ — неактивный, активный и критически активный. Интенсивность сигнала АЭ (энергия) рассматривается в четырех вариантах — неактивный, низкой активности, активный и критически активный. Неопределенность заключена в расшифровке указанных понятий. Нет методики, дающей количественные значения этим параметрам. Поэтому методика носит качественный характер и должна настраиваться в каждом отдельном случае. Рекомендации по настройке отсутствуют. Типичная схема принятия решения о состоянии конструкций, принятая многими фирмами, представлена на рис. 5, где различные сочетания уровней активного (амплитуда) и интенсивного (число импульсов в секунду) источников определяют ту или иную степень опасности.

На основании этого подхода построены модели принятия решения о состоянии материала конструкции аппаратурой некоторыми другими фирмами, в частности, «Интерюнис» (Россия) [22].

Критически интенсивный	Критически интенсивный источник Уровень 4 (красный цвет)		
Интенсивный	Интенсивный источник Уровень 3 (оранжевый)		
Низкой интенсивности	Низкой активности Уровень 1 (зеленый)	Активный, но неинтенсивный Уровень 2 (желтый)	
Неактивный			
Характер источников	Неактивный	Активный	Критически активный

Рис. 5. Классификатор источников АЭ

При этом разработчики предполагают, что основной расчетной модели служат известные закономерности механики разрушения применительно к трещинам. Предварительная дефектоскопия и анализ конструкции позволяют разбить ее на отдельные участки, которые затем исследуют при помощи АЭ с учетом выявленных особенностей. Решение принимается по установленному для каждой части конструкции критическому числу импульсов. На основании решения делаются выводы о состоянии материала конструкции. В обоих случаях технология, приведенная на рис. 5, не имеет метрологической аттестации и является сугубо «прикладной». Несколькими позднее фирма PAC (Physical Acoustic Corporation, США) увеличила число градаций значимости источников АЭ, лоцируемых на испытуемом объекте, и представила свою схему принятия решения Монрас (табл. 2) [32].

По существу принятие решения о состоянии конструкции по методике Монрас ничем не отличается от рассмотренных выше. Надо отметить, что число компаний, использующих АЭ при контроле конструкций, растет быстрыми темпами как в Украине, так и за рубежом.

Достаточно интересную методику оценки состояния материала предложил Т. Б. Петерсен [17]. Им разработана автоматическая система классификации на принципе распознавания образа. В своей работе автор использует известное в теории распознавания образа расстояние между исследуемыми кластерами информации. Минимизируя это расстояние, Т. Б. Петерсен добился положительных результатов, сравнивая искусственные источники излучения в лабораторных условиях. При этом в качестве исходных использовали 10 параметров, включая амплитуду АЭ и число событий. На основании этого подхода и образуются кластеры АЭ параметров. Подобный подход использовали В. А. Стрельченко, В. В. Данилин и С. Н. Пичков [20]. Их технология использует так называемые кластеры поврежденности материала, определяемые величиной рабочего параметра АЭ, значение которого принимается во внимание, если коэффициент корреляции между напряжениями и обобщенным параметром АЭ по отношению к энтропии становится наибольшим. На основании такого анализа принимается решение о возможном разрушении.

Применение разработанных схем для практического анализа состояния материала не приводится. Следует отметить, что Т. Б. Петерсен наиболее близко подошел к решению задачи количественной оценки состояния материала, однако, если судить по публикации, выбранное сочетание параметров и схема решающего правила в приведенном виде не позволяют приме-



Таблица 2. Распознавание опасности АЭ излучения

Тип источника	Характер источника	Действие персонала
Незначительный источник	Незначительный источник	Продолжить эксплуатацию в штатном режиме
A	Очень незначительный источник	Продолжить эксплуатацию в штатном режиме
B	Незначительный источник	Визуальный внешний осмотр
C	Действующий источник	Исследование НК
D	Активный источник	Немедленное применение НК
E	Интенсивный источник	Немедленное решение

нить полученное решение для распознавания состояния материала при контроле промышленных объектов.

Анализ применяемых в мире методик для распознавания состояния контролируемых конструкций показывает, что все методики базируются на японской технологии с попытками ее улучшения для конкретных условий испытаний. При этом методики остаются приближенными, причем степень приближения к действительности не оценивается.

В то же время промышленность все более жестко выдвигает требования количественной с определенной степенью достоверности оценки несущей способности контролируемых конструкций.

Подводя промежуточный итог, можно констатировать, что развиваемые методики и технологии контроля конструкций с применением АЭ до сих пор в мировой практике не получили количественной оценки результатов контроля. Качественно новую технологию контроля помогла создать методика, базирующаяся на теории дискриминантного анализа. Первые шаги в этом направлении были сделаны Т. Б. Петерсеном, как было показано выше. Ему не удалось решить эту задачу из-за сложности и громоздкости решающих правил, которые он применял при анализе АЭ. Прорыв

в этом направлении может быть сделан, если соединить эксперимент с аналитическим описанием распространяющихся в конструкциях акустических волн.

Для этого в классификатор событий, разделяющий поступающую на анализ информацию, необходимо включить канал самообучения, что даст возможность решить поставленную задачу до конца в определенных границах ошибки при заданной вероятности протекания процесса разрушения. На рис. 6 представлена блок-схема работы одного из вариантов такой технологии [9].

Здесь информация с контролируемого объекта поступает в расчетно-аналитический блок, где формируется вектор состояния материала (ВСМ) по параметрам АЭ и другим параметрам, характерным для работоспособности данной конструкции. Информативность всех параметров определяет решающее правило, позволяющее отбросить те из них, которые не несут информации в пределах установленных значений вероятности и ошибки. На следующем этапе проводится анализ ВСМ по существующим эталонам. При несовпадении показаний сравнения вводится блок самообучения, построенный на базе аналитических разработок АЭ. Блок самообучения устраняет «невязку» до уровня принятых допущений по ошибке и информация поступает в блок принятия решения, где на основе минимизации риска принимается решение о состоянии материала конструкции. На рис. 7 представлены действия дежурного персонала в зависимости от возникшей ситуации при контроле, например, крупногабаритной емкости, наполненной жидким продуктом. Там же для иллюстрации процесса расчета остаточного ресурса по данным прогнозируемой разрушающей нагрузки приведен график-схема со случайными по годам значениями разрушающей нагрузки. На графике виден физический остаточный ресурс. Допустимый остаточный ресурс определяется по допустимому превышению прогнозируемой разрушающей нагрузки над рабочей. Сверху в левой части графика приведена вероят-



Рис. 6. Адаптивная система распознавания состояния материалов



ность рассчитанной тенденции развития процесса разрушения.

Оборудование и нормативная документация. В настоящее время существует достаточно большое количество аппаратуры, работающей на основе АЭ, и разработчиков этой аппаратуры [8, 19, 22]. Выпускаемая АЭ аппаратура может быть условно разбита на два вида:

– аппаратура, основное назначение которой, как уже было сказано, определять координаты областей активности АЭ в конструкции. При этом последующий анализ состояния материала на участках с высокой активностью АЭ при помощи методов НК позволяет определить, какая часть полученной АЭ информации соответствует наличию реальных дефектов в конструкции. Следует отметить, что при работе по такой схеме необходимы предварительные настройки оборудования во избежание большого количества ложных сигналов;

– аппаратура, прогнозирующая разрушающую нагрузку и остаточный ресурс конструкций с заданной вероятностью и погрешностью. Такая аппаратура в настоящее время выпускается в двух модификациях — переносная (мобильная) и стационарная для непрерывного мониторинга конструкций в течение длительного времени. Последняя наиболее предпочтительна, так как позволяет получать информацию непрерывно, что дает возможность более точного определения параметров работоспособности материала конструкции.

Подавляющее большинство выпускаемой АЭ аппаратуры относится к первому виду, хотя ее возможности и пытаются расширить, комплектуя различными специализированными программами обработки АЭ сигналов. Имеются попытки использовать такую аппаратуру для оценки состояния материала конструкций. Однако, как было сказано, эти попытки не дают возможности количественной оценки и, тем более, не могут прогнозировать ситуацию, возникшую

в материале при его разрушении, особенно на начальных стадиях, когда еще можно успеть принять решение по действиям персонала и выводе конструкции из аварийной ситуации.

Применение любой контролирующей аппаратуры и методик регламентируют нормативные документы. С учетом особенностей осуществления контроля в странах СНГ и в Украине можно выделить три уровня документации:

– первый уровень — разрешительная документация, которая определяет общие правила, установленные государственной организацией, в ведении которой находится контроль за безопасностью эксплуатации конструкции. Данный уровень документации разрешает применять тот или иной метод контроля, не указывая, каким образом следует это делать;

– второй уровень — общая документация по применению метода в промышленности с формулировкой общих положений. Как правило, такая документация разрабатывается Госпотребстандартом Украины или службами на ее основе, например, техническими комитетами Госпотребстандарта Украины по определенным направлениям деятельности;

Штатный режим (зеленая полоса) Первое предупреждение (желтая полоса) Второе предупреждение (оранжевая полоса) Аварийная ситуация (красная полоса)

Операция	Показания индикатора в левом верхнем углу дисплея	Действия персонала
1	Зеленая полоса	Штатный режим. Продолжить эксплуатацию.
2	Желтая полоса	Внимание! При появлении прогнозируемого разрушающего давления и превышении его над рабочим более чем в два раза – продолжить эксплуатацию.
3	Оранжевая полоса	При превышении прогнозируемого разрушающего давления над рабочим менее чем на 30 % остановить эксплуатацию.
4	Красная мигающая полоса	Остановить эксплуатацию. После появления продолжительного прерывающегося звукового сигнала – срочный сброс нагрузки.

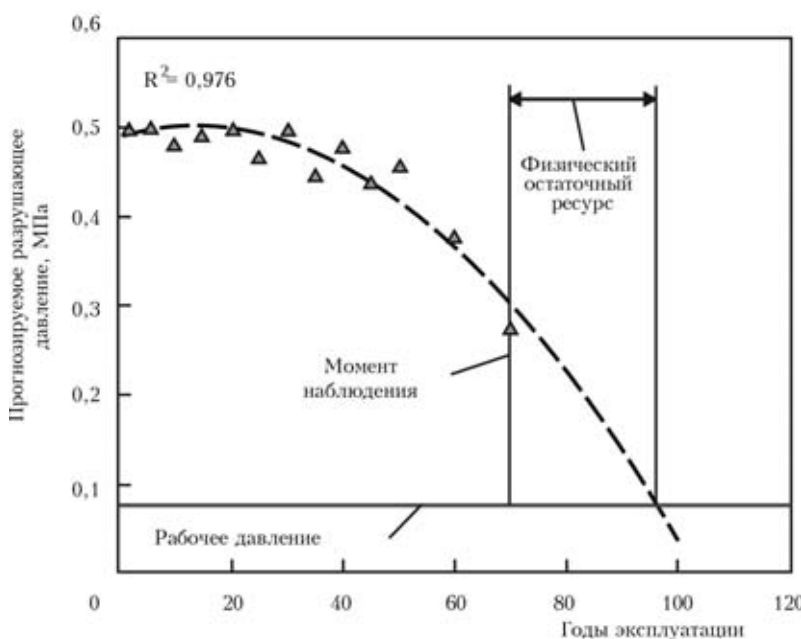


Рис. 7. Действие персонала и расчет остаточного ресурса



– третий уровень — специализированная по отношению к изделию или их группе документация относительно конкретного применения технологии контроля. Как правило, это подробная документация, описывающая все особенности применения технологии с учетом конкретного изделия.

Работы в области контроля с применением АЭ технологии нормативная документация, определяющая технику и специфические особенности применения оборудования и методик, регламентируется правилами изготовления и безопасной эксплуатации сосудов, работающих под давлением НАОП 0.00-1.07–94 (нормативная документация первого уровня). Общеизвестно, что применение АЭ технологии в производстве, как и любой другой, требует специальной подготовки персонала. За рубежом подготовке контролирующего персонала уделяется исключительно важное на государственном уровне значение, хотя непосредственный контроль во многих случаях осуществляют частные фирмы, например TUV в Германии и других странах. TUV, кроме контролеров, готовит также технических экспертов, на которых возложена ответственность за принятие решения о возможности дальнейшей эксплуатации конструкций по результатам контроля. В странах СНГ и в Украине подготовка специалистов в области контроля также имеет определенную специфику, так как именно контролеры в этих странах должны давать заключение о состоянии конструкций и назначать срок ее дальнейшей эксплуатации. Такая постановка задачи требует введения в программу обучения курса технической диагностики с понятием прогнозирования состояния конструкций с заданной вероятностью, что предусматривает соответствующая нормативная документация. С учетом изложенного выше в Украине по

специальности «АЭ контроль» готовятся специалисты трех уровней. Первый и второй уровень — это специалисты по НК с применением АЭ. При этом решение о состоянии контролируемого объекта принимается на основании традиционной нормативной документации или специалистами, прошедшими обучение с курсом технической диагностики. На третий уровень подготовки аттестуются специалисты, принимающие решение о состоянии объекта на основании показаний диагностической АЭ аппаратуры. В программу подготовки специалистов третьего уровня входит курс технической диагностики, даются более глубокие представления об АЭ и технологии контроля на ее основе. Эту работу проводят специальные центры на государственной основе. Структура применения АЭ технологии в Украине представлена на рис. 8. Как видно из схемы, технология контроля состояния конструкций предусматривает все необходимые элементы системы — аппаратуру контроля, ее метрологию, метрологию методики контроля, необходимую документацию по применению технологии и аппаратуры и документацию по принятию решения. Технология также предусматривает подготовку контролирующего персонала и обслуживание клиентов и техники.

Следует отметить также общемировые тенденции в разработке и применении АЭ технологии при контроле состояния конструкций и сооружений. В последнее время возникло понятие так называемой интеллектуальной технологии и интеллектуальной конструкции. Понятие интеллектуальных конструкций, например мостов, все чаще встречается в употреблении и подразумевает конструкции, которые сами дают знать, в каком состоянии они находятся, и следует ли прекращать их эксплуатацию. Такие конструкции начали по-

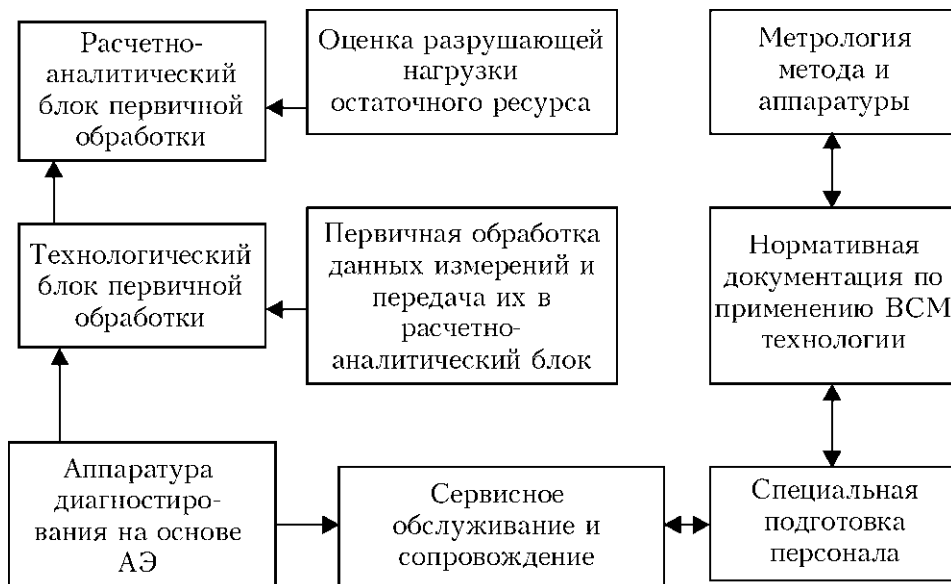


Рис. 8. Блок-схема технологии по обеспечению безопасности эксплуатации конструкций

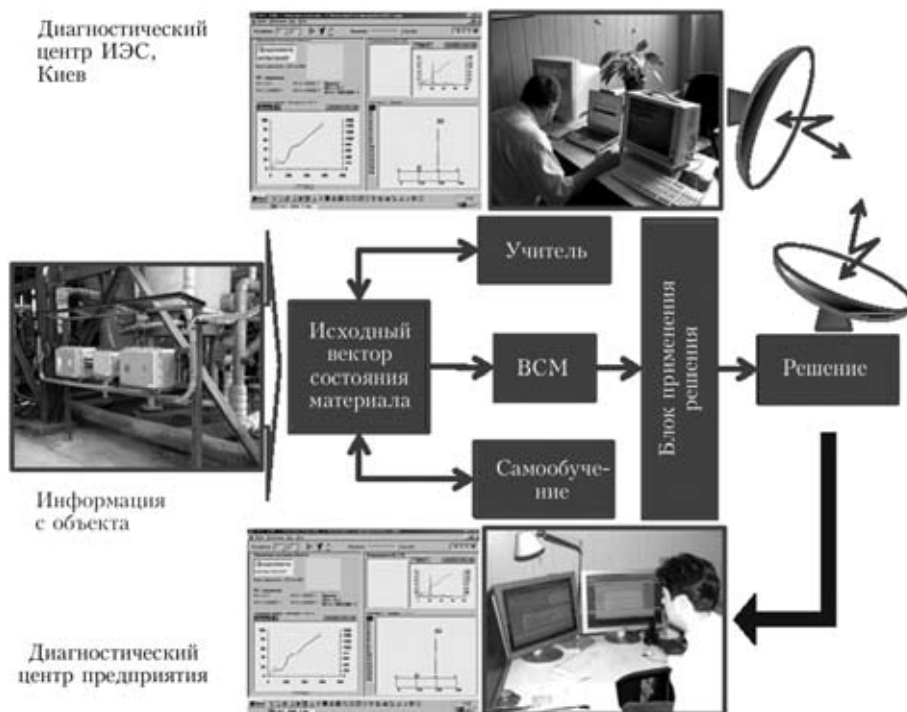


Рис. 9. Дистанционное управление эксплуатацией конструкций

являться в США, Финляндии и в Украине. На ряде предприятий Украины уже более 8 лет работают стационарные диагностические системы непрерывного мониторинга, определяя состояние конструкций с заданной вероятностью и при установленных пределах погрешности. При этом диагностическая информация передается по компьютерным сетям как в диагностический центр предприятия, так и в дублирующие центры, находящиеся на любом расстоянии от контролируемой конструкции (рис. 9).

Для повышения эффективности внедрения в промышленность технологий на основе метода АЭ в ряде стран созданы рабочие группы, объединяющие специалистов-разработчиков АЭ технологий и пользователей. Это следующие группы и объединения:

АЕWГ — Американская рабочая группа по АЭ;
JCAE — Японский комитет по АЭ;
EWGAE — Европейская рабочая группа по АЭ;
GLEA — Латино-американская рабочая группа по АЭ;

УРГАЭ — Украинская рабочая группа по АЭ при ТК 78;

РРГАЭ — Российская рабочая группа по АЭ при Госгорнадзоре России.

Указанные рабочие группы проводят необходимые исследования в направлении АЭ, создают и распространяют необходимую нормативную документацию, проводят научные и практические конференции и семинары. С целью придания работам по АЭ контролю большего значения и усиления их координации, при 135 комитете ИСО

по НК создан подкомитет № 9 «Acoustic emission testing» с центром, расположенным в Бразилии, который в 2006 г. приступил к координации работ в области применения АЭ при контроле и испытании конструкций и сооружений.

Выводы

Стремительное развитие средств контроля конструкций, особенно применяющих АЭ технологию, и то внимание, которое уделяется этому вопросу мировым сообществом, дает возможность предположить широкое применение АЭ для создания «интеллектуальных конструкций и сооружений», которые с заданной точностью и вероятностью сами будут сообщать о своем состоянии и предлагать меры выхода из затруднительных ситуаций. Другими словами, системы непрерывного мониторинга, использующие интегральные методы контроля и, в частности, АЭ, будут все шире применяться при контроле сначала опасных в эксплуатации, а затем, по мере упрощения технологии их создания, и в обычных промышленных конструкциях.

Следует также предположить расширение сети специализированных центров контроля эксплуатирующихся конструкций. Такие центры будут укомплектованы специалистами высокой квалификации, а современные цифровые технологии и средства коммуникации позволят им проводить мониторинг и оценивать состояние конструкций дистанционно, находясь от объекта контроля на любом расстоянии.



1. *Алешин Н. П.* Оценка остаточного ресурса сварных конструкций // Сварка и Диагностика. — 2007. — №2. — С. 4–10.
2. *Бигус Г. А.* Требования к системам технического диагностирования оборудования стартовых комплексов ракет-носителей // Свароч. пр-во. — 2004. — № 10. — С. 50–55.
3. *Бирюкова Н. П., Соловьева М. О.* Опыт организации и работы с экзаменационными центрами при ОС «СертиНК» // В мире неразруш. контроля. — 2002. — № 4. — С. 62–63.
4. *Варовин А. Я., Карзов Г. П., Марголин Б. З.* Проблемы прогнозирования работоспособности конструкций по данным НК // Там же. — 2006. — № 4. — С. 6–11.
5. *Влияние длительной эксплуатации на вязкость трубной стали 17ГС / С. А. Котречко, А. Я. Красовский, Ю. Я. Мешков и др.* // Проблемы прочности. — 2002. — № 6. — С. 21–30.
6. *Кузьмин А. Н., Жуков А. В., Журавлев Д. Б.* Акустико-эмиссионная диагностика магистральных газопроводов с применением тензометрии // В мире неразруш. контроля. — 2002. — № 4. — С. 60–62.
7. *Махненко В. И.* Совершенствование методов оценки остаточного ресурса сварных соединений конструкций длительного срока эксплуатации // Автомат. сварка. — 2003. — 10/11. — С. 112–121.
8. *Назарчук З. Т., Скальский В. Р.* Акустико-емісійне дiагностування елементiв конструкцiй / Наук.-техн. посiбник. — Т. 1–3. — Киев: Наук. думка, 2009. — С. 872.
9. *Недосека А. Я.* Основы расчета и диагностики сварных конструкций / Под ред. Б. Е. Патона. — Киев: Индпром, 2008. — 814 с.
10. *Недосека А. Я., Недосека С. А.* Акустическая эмиссия и ресурс конструкций // Техн. диагностика и неразруш. контроль. — 2008. — № 2. — С. 5–19.
11. *Недосека С. А., Недосека А. Я.* Диагностические системы семейства «ЕМА». Основные принципы и особенности архитектуры (Обзор) // Там же. — 2005. — № 3. — С. 20–26.
12. *Недосека С. А., Недосека А. Я.* Комплексная оценка поврежденности и остаточного ресурса металлов с эксплуатационной наработкой // Там же. — 2010. — № 1. — С. 9–16.
13. *Применение АЭ технологии при непрерывном мониторинге оборудования Одесского припортового завода / А. Я. Недосека, С. А. Недосека, М. А. Яременко и др.* // Там же. — 2008. — № 4. — С. 85–95.
14. *Панасюк В. В., Андрейкив А. Е., Партон В. З.* Основы механики разрушения материалов. Справ. пособие в 4 т. / Под общей ред. В. В. Панасюка. — Т. 1. — Киев: Наук. думка, 1988. — 487 с.
15. *О некоторых путях построения автоматических информационно-измерительных систем для диагностики надежности сварных конструкций / Б. Е. Патон, И. В. Кудрявцев, А. Я. Недосека, А. Е. Коротынский* // Автомат. сварка. — № 9. — 1974. — С. 1–5.
16. *Патон Б. Е., Лобанов Л. М., Недосека А. Я.* Техническая диагностика: вчера, сегодня и завтра // Техн. диагностика и неразруш. контроль. — 2003. — № 4. — С. 6–10.
17. *Петерсен Т. Б.* Разработка и использование автоматической системы классификации для идентификации сигналов акустической эмиссии // Там же. — 1993. — № 3. — С. 3–9.
18. *Ремонт магистральных и промышленных газопроводов.* Справ. пособие / Под ред. А. И. Степаненко. — Киев: Интерграфик, 1996. — 191 с.
19. *Смиян О. Д.* Распределение водорода в зоне деформационных трещин // Журн. физич. химии. — 1980. — Т. LIV. — № 11. — С. 2913–2917.
20. *Стрельченко В. А., Данилин В. В., Пичков С. Н.* Определение степени поврежденности конструктивных сталей по сигналам акустической эмиссии // Техн. диагностика и неразруш. контроль. — 1999. — № 3. — С. 74–81.
21. *Харебов В. Г., Кузьмин А. Н., Жуков А. В.* Совершенствование методики диагностики трубопроводов с применением метода акустической эмиссии // В мире неразруш. контроля. — 2009. — № 4. — С. 5–9.
22. *Харебов В. Г., Бородин Ю. П., Шанорев В. А.* Система комплексного диагностического мониторинга опасных производственных объектов // Там же. — 2006. — № 4. — С. 13–17.
23. *Шаталов А. А., Разуваев И. В., Костюков В. Н.* Опыт реализации стратегии обеспечения безопасности нефтехимических производств при их эксплуатации по фактическому техническому состоянию // Химическая технология. — 2003. — № 3. — С. 11–13.
24. *Черепанов Г. П.* Квантовая механика разрушения // Пробл. прочности. — 1990. — № 2. — С. 3–9.
25. *Эксплуатацию кранов можно продлить / О. Григоров, А. Рахманый, А. Садило, В. Макац* // Охрана труда. — 2009. — № 2. — С. 27–29.
26. *Obodovsky B., Fedchun A., Nedoseka Ya.* Application of a Permanent Acoustic Emission Monitoring System on Four Ammonia Storage Tanks // Ammonia Plant Safety. AIChE Technical Manual. — 2006. — 39. — P. 24–34.
27. *Balderston H. L.* The broad range detection of incipient failure using the acoustic emission phenomena // A symposium presented at the December Committee Week American Society for Testing and Materials. — Bal Harbour, — 7-8 Dec. — 1971. — P. 297–317.
28. *Watanabe T., Hashirizaki S., Arita H.* Inspection of large pressure vessels by the acoustic emission technique // Weld. and Metal Fabrication. — 1975. — Sept. — P. 525–527.
29. *Watanabe T., Hashirizaki S., Arita H.* Метод оценки дефектов в сооружениях, основанный на контроле акустической эмиссии // ВЦП. — В-40573. — 28 с. — «Хихакай кенса», 1978. — 27, № 4. — С. 225–232.
30. *Acoustic Emission Monitoring of Pressure Vessels During Proof Test / Etienne Soutif, Catherine Herve, Fan Zhang, Marc Deschamps* // Ammonia technical manual. — 1999. — P. 251–263.
31. *Acoustic Emission Monitoring of Bridge Structures in the Field and Laboratory / Rhys Pullin, Karen M. Holford, Robert J. Lark, Mark J. Eaton* // J. of Acoustic Emission. — 2008. — 26, January-December. — P. 172–181.
32. *Stanley R.* Experience of using a non-intrusive approach to the inspection of a 23 year ammonia storage tank // Ammonia Technical Manual. — 2004. — P. 204–230.

Ин-т электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины,
Киев

Поступила в редакцию
15.04.2010