



НАДЕЖНОСТЬ ЭКСПЛУАТАЦИИ СВАРНЫХ КОНСТРУКЦИЙ. ОЦЕНКА И УПРАВЛЕНИЕ

Академик **Б. Е. ПАТОН**, академик НАН Украины **Л. М. ЛОБАНОВ**, **А. Я. НЕДОСЕКА**, д-р техн. наук (Ин-т электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины),
А. Ю. ФЕДЧУН, **А. А. ЕЛКИН**, **Б. М. ОБODOВСКИЙ**, инженеры (Одесский припортовый завод)

Представлена технология и аппаратура для неразрушающего контроля состояния сварных конструкций с оценкой разрушающей нагрузки и остаточного ресурса. Прогнозируемая разрушающая нагрузка и остаточный ресурс определяются в процессе эксплуатации при рабочей нагрузке. Показано применение системы при контроле оборудования Одесского припортового завода.

Ключевые слова: сварные конструкции, надежность эксплуатации, техническая диагностика, акустическая эмиссия, прочность

Некоторое время назад мы мечтали, что придет такая пора, когда можно будет достаточно точно определить, в каком состоянии находится та или иная конструкция, нужно ли выводить ее из эксплуатации или она еще в состоянии работать [1]. Сейчас разработки в области прочности материалов, диагностики и прогнозирования их работоспособности, вычислительной и измерительной техники шагнули настолько далеко, что появилась возможность реализовать на практике такие методы. Разработанные технологии позволяют из единого центра дистанционно оценить и прогнозировать состояние эксплуатируемой конструкции, где бы она ни находилась. Это существенное достижение науки и техники. Контроль постепенно из рутинного и трудоемкого превращается в удобный офисный. Мы уже видим будущее, когда системы непрерывного мониторинга будут работать на всех опасных объектах Украины, обеспечивая безопасность и надежность их эксплуатации [2].

Современное развитие техники обусловило создание сварных металлических сооружений крупных размеров, эксплуатация которых проходит в весьма сложных условиях. К таким объектам прежде всего относятся крупногабаритные хранилища опасных веществ, корпуса судов, доменные печи, их воздухонагреватели и засыпные аппараты, телевизионные башни, башни-трубы тепловых электростанций длиной более 300...500 м, собственно электростанции, мосты, сверхмощные шагающие экскаваторы, башенные краны судостроительных заводов, компрессорные станции газопроводов и т. д.

Надежная эксплуатация перечисленных металлоконструкций в основном определяется несущей

способностью их силовых частей и сварных узлов. Однако расчет несущей способности элементов конструкций, обеспечивающий достаточную надежность, затруднен по ряду причин.

Затруднения в оценке состояния сварных металлоконструкций в настоящее время преодолевают в большинстве случаев принятием конструктивных решений при их проектировании путем установления больших запасов для основных прочностных свойств. При этом не только удорожается сооружение, но и снижаются его технико-экономические характеристики.

Такой подход связан с большими затратами времени, труда и средств и не всегда дает желаемые результаты, так как воспроизвести весь спектр эксплуатационных условий при испытании сложных конструкций весьма затруднительно. В реальных условиях конструкция может работать в режимах, существенно отличающихся от принятых при испытаниях и тем более при расчетах ее несущей способности.

Средством для решения задачи обеспечения безопасности эксплуатации сварных конструкций является создание информационно-измерительных систем, позволяющих оценить еще на стадии испытаний надежность конструкций, а также контролировать работоспособность конструкций или головного образца серии непосредственно в процессе работы.

Целью данной статьи является анализ работок ИЭС им. Е. О. Патона в области создания технологии и аппаратуры непрерывного мониторинга сварных конструкций, а также реализация этих разработок в промышленности.

Современное развитие средств вычислительной техники, радиоэлектроники, прикладной математики, техники испытаний, науки о прочности материалов и механики сплошной среды позволяет решить задачу непрерывного контроля ра-

ботоспособности применительно к различным типам сварных конструкций.

Для работы информационно-измерительной системы необходимо регулярное получение оперативных данных, прежде всего, о состоянии узлов конструкции и различного рода дефектов, которые накапливаются при эксплуатации. При наличии данных о конструкции и соответствующей обработке этой информации можно оперативно, в реальном режиме времени оценивать ее несущую способность.

Это, в частности, дает возможность получить большие технические и экономические выгоды в тех областях техники, где из-за незнания истинных эксплуатационных нагрузок дорогостоящие натурные конструкции испытывают до разрушения с целью получения прочностных характеристик и создания технической документации на их серийное производство.

В последнее время вырос общий объем работ в области создания «интеллектуальных» конструкций, оснащенных системами непрерывного контроля с выдачей рекомендаций обслуживающему персоналу [1–7]. Системы контроля такого рода должны обеспечить возможность конструкции давать информацию о своем состоянии, возможности или невозможности ее дальнейшей эксплуатации, формулировать условия, при которых дальнейшая эксплуатация конструкции остается надежной.

С 1978 г. на Одесском припортовом заводе (ОПЗ) начали функционировать четыре изотермические емкости, предназначенные для хранения и перегрузки аммиака, поступающего на завод по специальному трубопроводу из Тольятти и перегружаемого далее в отсеки танкеров [8, 9]. Общий вид хранилища аммиака объемом 34 тыс. м³, диаметром 52 м и высотой 21 м приведен на рис. 1.

Объем перегрузки аммиака составлял около 5 млн т в год, включая 1 млн, которые производятся непосредственно на заводе.



Рис. 1. Общий вид хранилищ аммиака ОПЗ

Производство, хранение и перегрузка аммиака относятся к сфере опасных производств. Поэтому в 2002 г., когда закончился срок регламентной эксплуатации хранилищ и оборудования завода, было проведено заседание научно-технического совета предприятия, где была отмечена необходимость принятия дополнительных мер по обеспечению дальнейшей их безопасной эксплуатации. Решением научно-технического совета было поручено разработать 10-летний план оснащения завода системами непрерывного мониторинга основных производств на базе передовых технологий контроля, позволяющих заблаговременно оценить и предотвратить аварийную ситуацию технологического оборудования, не прекращая его эксплуатацию. В соответствии с планом была начата работа по разработке и оснащению таким оборудованием конструкций основных производств, работающих с аммиаком.

Первая диагностическая система контроля аммиакохранилищ, построенная на основе акустической эмиссии (АЭ), разработана ИЭС им. Е. О. Патона НАН Украины совместно с венгерской фирмой «Видеотон». Система смонтирована на хранилище аммиака ST-4 и запущена в 2003 г. В течение следующих трех лет оборудованием непрерывного мониторинга были оснащены еще три хранилища, а в 2006 и 2007 годах такое оборудование заработало в цехах производства аммиака (рис. 2). На рис. 3 представлена структурная схема технологии, обеспечивающей решение поставленной задачи. Основой технологии является информация, поступающая с датчиков АЭ. Существует два блока обработки информации. Первый блок первичной обработки, где формируются данные измерений в формате, необходимом для работы аналитического блока. Во втором блоке информация поэтапно превращается в показатели, прогнозирующие разрушающую нагрузку и остаточный ресурс эксплуатирующейся конструкции. Технология предусматривает также подготовку специалистов к работе с контролирующим обо-



Рис. 2. Общий вид цеха производства аммиака ОПЗ



Рис. 3. Схема технологии контроля системой ЕМА 3



Рис. 4. Суммарные напряжения в оболочке корпуса хранилища

рудованием, разработку совместно с государственными органами необходимой для работы нормативной документации. Проводится аттестация измерительной части приборов и выдаются необходимые документы. Весь комплекс работ, сопровождающих поставку диагностического оборудования, является достаточным для успешной практической работы на предприятиях и заводах.

Введенная в действие на хранилищах ОПЗ диагностическая система уже в начале работы сразу же обнаружила развивающиеся микродефекты в районе приварки держателей труб нагнетания аммиака к корпусу цилиндрической обечайки хранилища. Дефекты были обнаружены в местах, которые не подлежали ранее контролю по существующей нормативной документации и являлись очагами, где в дальнейшем, накапливаясь с течением времени, могут образоваться более серьезные повреждения. Таким образом, качественно новый подход к контролю состояния конструкций показал свою эффективность непосредственно после запуска системы мониторинга. Разработка оборудования и технологии контроля состояния

хранилищ учитывала современные достижения в области науки о прочности материалов, в области вычислительной и измерительной техники.

Многолетний опыт работы ИЭС им. Е. О. Патона НАН Украины в области создания информационно-измерительных систем на основе АЭ, а также опыт работы венгерской фирмы «Видеотон» в области создания аппаратуры позволили спроектировать, изготовить и запустить промышленную контрольно-диагностическую аппаратуру для длительного непрерывного мониторинга. К настоящему моменту ею оснащены четыре хранилища аммиака и оборудование двух цехов по его производству.

Выполнению расчетно-аналитических работ по созданию диагностической системы непрерывного мониторинга пред-

шествовали работы по исследованию напряженного состояния отдельных узлов конструкции корпуса хранилища. Стенки цилиндрических резервуаров хранилищ изготовлены из листов низкоуглеродистой стали марки А-537С1 (ASTM) переменной толщины, уменьшающейся с его высотой. Необходимо было оценить корпус хранилищ и оборудование цехов с выделением и классификацией зон с различным уровнем напряженного состояния и дефектности. В частности, установлено, что за прошедшие более чем 20 лет эксплуатации хранилищ остаточные сварочные напряжения в швах не претерпели существенных изменений и достигали, как и в исходном состоянии, предела текучести свариваемых материалов (для принятых в изготовлении корпуса сталей $\sigma_T = 360$ МПа). На рис. 4 показаны суммарные остаточные сварочные напряжения и напряжения, вызванные нагрузкой от наполненного жидким аммиаком бака, в районе уторного шва. Как видно из рисунка, максимальные напряжения сосредоточены в сварных швах, где достигают в узкой полосе шириной 10...12 см предела текучести при растяжении.

На рис. 5 представлена типовая блок-схема системы непрерывного мониторинга, разработанная специально для контроля хранилищ аммиака и оборудования цехов по его производству, с передачей информации в диагностический центр предприятия и в системе Интернет на более далекие расстояния. Схема включает по 57 информационных каналов на каждом хранилище (48 акустических и 9 дополнительных, в том числе запасные каналы), контролирующие непрерывно около 4×3500 м² поверхности хранилищ.

Данные измерений по каналам связи поступают в два блока, оснащенных измерительной и компьютерной техникой, где происходит предва-

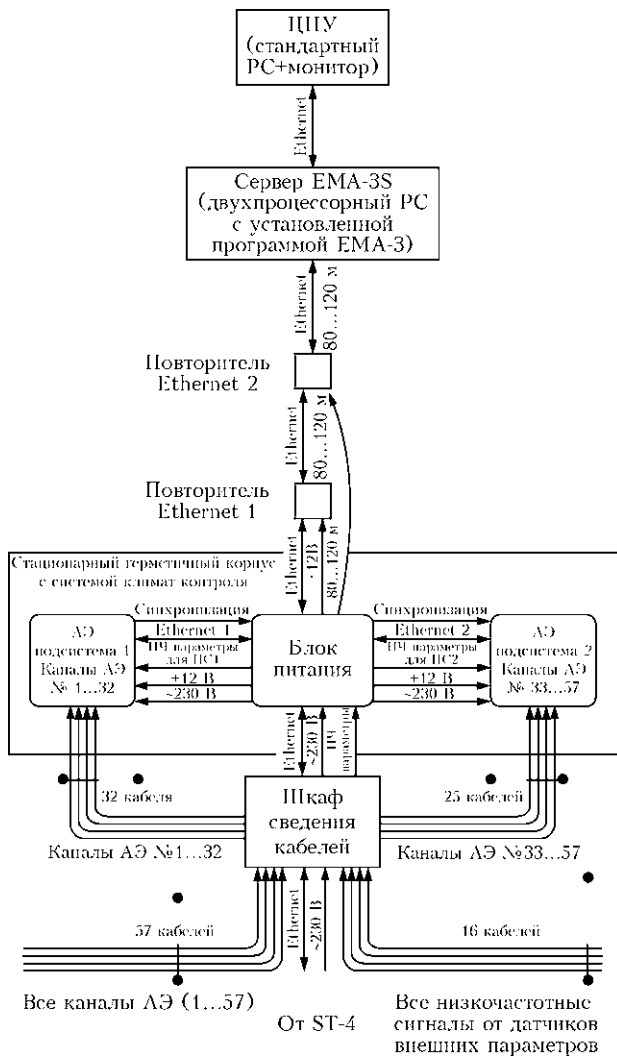


Рис. 5. Типовая блок-схема системы непрерывного мониторинга оборудования ОПЗ

рительная обработка информации. Учитывая, что блоки работают непрерывно на открытом пространстве, предусмотрен климат-контроль внутри блоков для обеспечения нормальных условий эксплуатации. Далее по линиям связи информация поступает в центральный сервер, где осуществля-

ется основная обработка информации с выдачей решения о состоянии контролируемых объектов. В частности, рассчитываются прогнозная разрушающая нагрузка и остаточный ресурс работоспособности конструкций корпусов хранилищ. Информация отображается на мониторе компьютера в центральном диагностическом центре завода.

Проведенные предварительные исследования и расчеты позволили установить области корпуса хранилища, которые должны контролироваться с повышенным вниманием. Общий вид стационарной системы непрерывного мониторинга EMA-3S, установленной в цехе производства аммиака, а также мобильная система семейства EMA представлены на рис. 6. На рис. 7 показана схема последовательности обработки диагностической информации, поступающей с контролируемых объектов.

Метрологические характеристики аппаратуры устанавливаются по следующим блокам параметров: электронная часть аппаратуры; измерительные датчики блокоизмерения координат АЭ событий; блок прогнозирования разрушающих нагрузок.

Наиболее серьезные технические требования предъявляются к блоку 2 (1-го этапа обработки), который передает исходную информацию на блок 2 (2-го этапа обработки). Блок 1 связан с измерительными приборами и датчиками, установленными на объекте.

От надежности и точности информации, поступающей в блок 3 и далее в блоки 4 и 5, зависит точность прогноза разрушающей нагрузки и остаточного ресурса. Если блоки 3–5 достаточно хорошо отработаны в мировой практике, то организация работы блока 2 связана с существенными трудностями извлечения информации с заданной вероятностью и точностью перед последующим направлением ее в блок 3. Представленные соображения предъявляют принципиально новые, очень серьезные требования к построению архитектуры диагностического оборудования и про-



Рис. 6. Стационарный (а) и мобильный (б) варианты диагностической системы семейства ЕМА

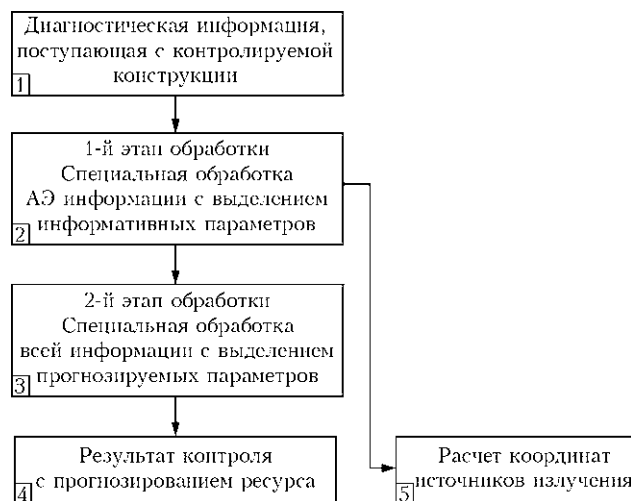


Рис. 7. Этапы обработки информации диагностической аппаратурой на основе АЭ

цедуре его аттестации. Так, для систем АЭ мониторинга семейства ЕМА предусмотрена аттестация по четырем блокам параметров. Заключительными этапами аттестации являются этапы измерения координат источников АЭ и определения разрушающей нагрузки.

Технология АЭ контроля эксплуатации хранилищ и оборудования ОПЗ. Процесс мониторинга выполняется системой ЕМА-3S непрерывно и автоматически. Каждая из измерительных систем ЕМА-3S использует отдельный управляющий компьютер, на котором сохраняются файлы проведенных измерений. Сохранение данных происходит с задаваемой оператором периодичностью. Рекомендуемым интервалом сохранения данных является 0,5...2 ч.

По результатам измерений программа проводит расчет разрушающей нагрузки и остаточного ресурса контролируемых конструкций, данные по которым сохраняются в базе данных и выдаются на экран компьютера в числовом и графическом видах.

На рис. 8 представлено рабочее окно программы ЕМА-3S. В правой верхней части окна расположены графики реального времени, показывающие текущую нагрузку и темп появления непрерывной АЭ, которые характеризуют общее состояние объекта контроля и накопление незначительных повреждений. В верхней левой четверти окна испытаний программы ЕМА-3S расположен индикатор прогноза разрушающей нагрузки и предупреждения об опасности. При нормальном состоянии металла индикатор имеет зеленый цвет, прогноз разрушающей нагрузки отсутствует. Если в процессе измерения появляется повышенная акустическая активность, индикатор меняет цвет соответственно уровню предупреждения (смена цвета полос сопровождается коротким звуковым сигналом):

1-е предупреждение — желтый цвет, 2-е — оранжевый, 3-е — красный цвет, разделено на два уровня — опасный и аварийный (таблица). При прогнозировании системой разрушающей нагрузки на индикатор выводится значение прогноза (представлено нижним и верхним значениями в диапазоне погрешности не более $\pm 15\%$ при вероятности 0,95) и координат опасного места. В нижней правой четверти окна испытаний программы ЕМА-3S расположена схема объекта контроля, например, для аммиакохранилищ в виде развертки боковой поверхности с расположенными датчиками АЭ. Места возникновения акусти-

Действия персонала при различной индикации на экране дисплея системы ЕМА-2S

№ п/п	Показания индикатора в левом верхнем углу дисплея	Действия персонала
1	Зеленая полоса 	Штатный режим. Продолжать эксплуатацию
2	Желтая полоса 	Внимание. При появлении прогнозируемого разрушающего уровня налива и превышении его над рабочим более чем в два раза. Продолжать эксплуатацию
3	Коричневая полоса 	Оценить прогнозируемый разрушающий уровень налива по показаниям индикатора. При превышении прогнозируемого уровня над рабочим менее чем на 30 % остановить эксплуатацию. Провести дополнительный анализ поступающей информации в соответствии с инструкцией
4	Красная прерывно пульсирующая полоса 	Остановить эксплуатацию. Провести дополнительную проверку прочности корпуса хранилища в соответствии с инструкцией
5	Красная непрерывная полоса или непрерывно пульсирующая 	Аварийная ситуация. Остановить эксплуатацию. Срочный сброс нагрузки

* Смена цвета полос сопровождается коротким звуковым сигналом.

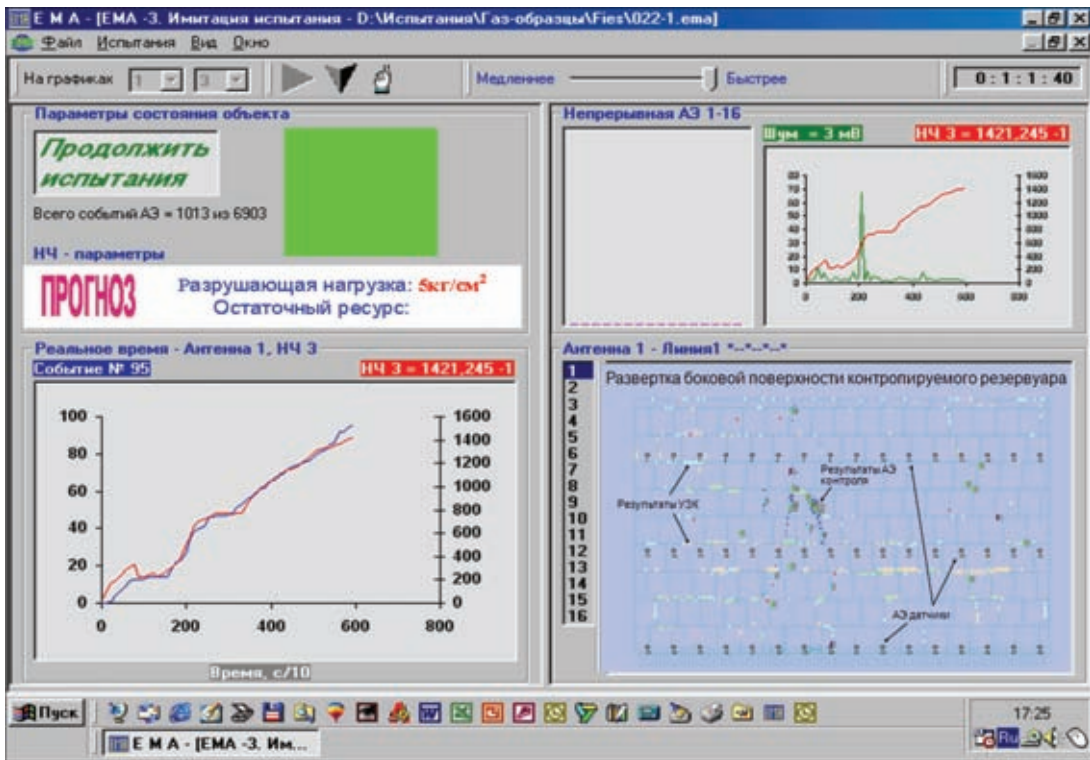


Рис. 8. Вариант рабочего окна программы системы EMA-3S

ческой активности отмечены прямоугольниками с флажком. Цвет прямоугольника указывает на уровень амплитуды последнего события АЭ в соответствии с настройками программы EMA-3S, а цвет флажка — на уровень опасности состояния в соответствии с приведенной выше шкалой цвета для 1-го – 3-го предупреждений.

В нижней левой части окна EMA-3S в виде графика представлена информация об уровне АЭ по активному каналу измерения (синим цветом) и действующая нагрузка в условных единицах (мВ) ($1 \text{ мВ} = 5,6 \cdot 10^{-3} \text{ кг/см}^2$) (красным). Характер указанных на графике кривых при нормальном состоянии конструкции должен быть горизонтальным или равномерно наклонным.

Расчет разрушающей нагрузки и остаточного ресурса аммиакохранилищ происходит автоматически. Результаты АЭ мониторинга выводятся на экран управляющего компьютера. К полученной во время контроля информации обеспечивается доступ по Интернет для ее периодического анализа специалистами и ее использования при формировании и совершенствовании эталонов для прогноза разрушающей нагрузки и остаточного ресурса. В случае возникновения сложной для анализа состояния конструкции ситуации проводятся дополнительные работы по его оценке. Например, уточнение текущего состояния аммиакохранилища осуществляют после остановки погруочно-разгрузочного процесса и других работ, вызывающих акустические шумы и электрические наводки на корпус резервуара.

При необходимости аммиакохранилище подвергают выдержке и принимают решение о его состоянии, пользуясь показаниями индикаторов в программе EMA-3S. Ориентировочные критерии работоспособности корпуса резервуара приведены в соответствующих нормативных таблицах для первых 10 мин контроля резервуара на выдержке.

При возникновении критической ситуации по таблице, п. 3, 4 следует принять необходимые меры по разгрузке корпуса хранилища аммиака.

Автоматизированная система непрерывного АЭ мониторинга EMA-3S имеет следующие встроенные средства обеспечения бесперебойной работы:

- источники бесперебойного электропитания;
- аппаратные устройства слежения за работой измерительных подсистем АЭ;
- специальные устройства для принудительной перезагрузки подсистем АЭ;

программы-агенты верхнего уровня для обеспечения бесперебойной работы программ EMA-3S и STIntegrator, осуществляющие в случае сбоев и неполадок их принудительный перезапуск.

Работа всех названных выше средств в комплексе обеспечивает бесперебойную работу системы в штатном режиме и в большинстве известных нештатных ситуаций.

Срок очередного технического освидетельствования контролируемых конструкций и оборудования может назначаться по фактическому состоянию на основании показания системы непрерывного АЭ мониторинга EMA-3S.

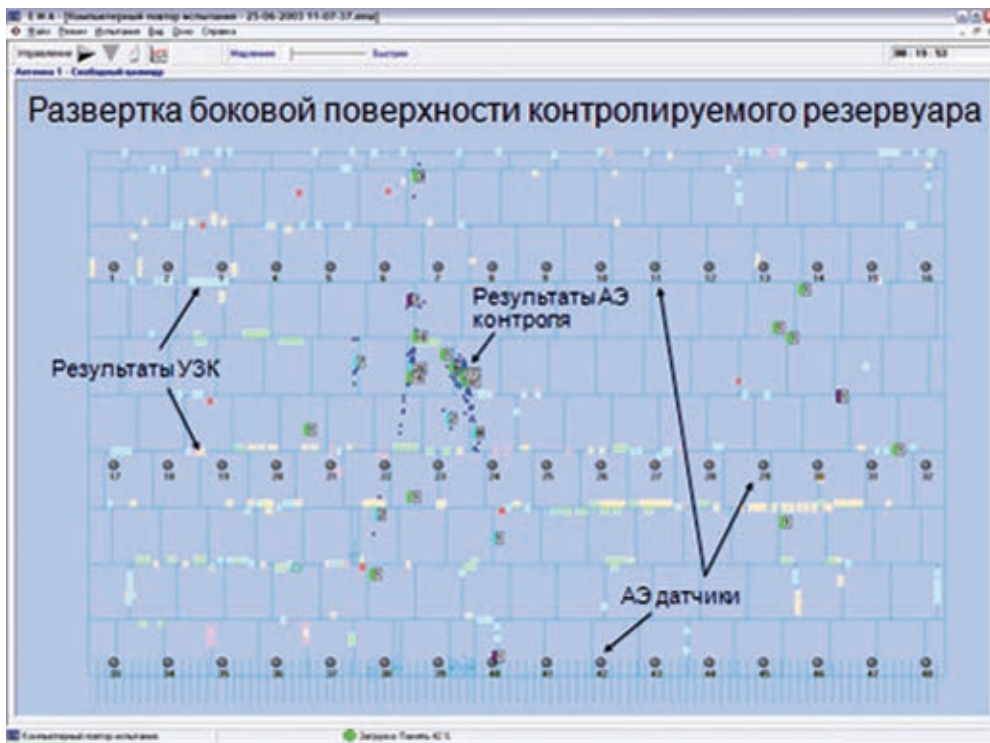


Рис. 9. Развертка на экране монитора боковой поверхности хранилища площадью 3500 м² (точками показаны места накопления усталостных повреждений)

Система рассчитана на бесперебойную работу в режиме непрерывного мониторинга в течение 16 лет.

На рис. 9 представлена выделенная из рабочего окна программы системы ЕМА-3S развертка боковой поверхности хранилища аммиака общей площадью 3500 м². Как было отмечено выше, че-

тыре таких хранилища контролируются 48×4 датчиками АЭ. Установлены также датчики деформаций и уровня налива, составляющие в совокупности вектор состояния материала. Анализ вектора состояния материала в каждый момент времени эксплуатации резервуара позволяет принимать решение о разрушающей нагрузке и ос-

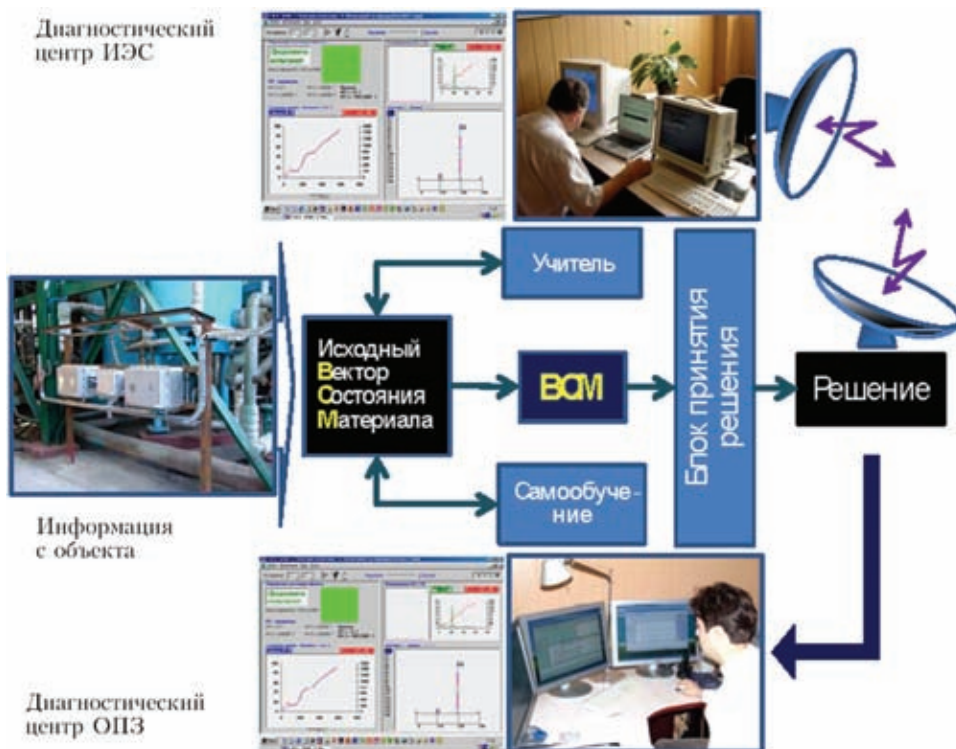


Рис. 10. Дистанционное управление эксплуатацией контролируемых конструкций

таточном ресурсе хранилища. На рис. 9 более четко видны черные круглые точки в средней части развернутой боковой поверхности резервуара, которыми отмечены места АЭ кластеров, где происходит накопление эксплуатационных повреждений. Данные области совпали с местами крепления кронштейнов нагнетательного трубопровода, совершающего колебательные движения в результате неравномерной работы нагнетающего аммиака насоса.

Существенное значение приобретает возможность дистанционного управления процессом эксплуатации контролируемых конструкций. При этом центр управления может быть расположен на любом и, в том числе, значительном расстоянии от контролируемого объекта. Данная возможность имеет большое значение и смысл. При необходимости (например, при освоении новых технологий контроля) консультативная помощь может быть оперативно оказана специалистами высокой квалификации сотрудникам диагностических центров предприятий, находящимся в другом, зачастую достаточно удаленном месте. На рис. 10 показана схема технологии, работающей в режиме дистанционного управления эксплуатацией контролируемых конструкций, организованная совместно ОПЗ и ИЭС им. Е. О. Патона. Специалисты аналитического центра в Киеве могут наблюдать ту же картину показаний контрольных мониторов, что и сотрудники контролирующей службы завода. Это дает возможность обсуждать результаты контроля и принимать по ним совместные взвешенные решения.

Состояние корпусов хранилищ по данным системы непрерывного мониторинга. Хранилища аммиака, как уже было отмечено, изготовлены и введены в эксплуатацию в 1978 г. Время регламентной работы для таких конструкций обычно принимается равным 20...25 лет. В течение этого периода предполагается отсутствие значимого влияния внутренних деструктивных процессов, протекающих в материалах конструкции при штатных режимах эксплуатации.

Однако с течением времени негативные процессы накопления повреждений в материалах начинают проявляться в виде отдельных всплесков микроразрушений. С одной стороны, начинают проявлять активность существующие в материалах дефекты, которые ранее при статочных ис-

пытаниях себя не проявляли в связи с высокими исходными свойствами материалов. С другой стороны, в результате структурных превращений на микро- и макроуровнях появляются и развиваются новые дефекты, которые постепенно образуют очаги скоплений (кластеры). Система непрерывного контроля показала перманентные во времени и на данный период эксплуатации неопасные всплески акустической активности в материалах корпусов хранилищ, что свидетельствует о непрерывном протекании изменений, связанных с процессом эксплуатационной наработки. Указанные обстоятельства требуют, чтобы эксплуатация корпусов хранилищ в послерегламентном периоде сопровождалась более строгим контролем состояния материала, что и обеспечивает диагностическая система непрерывного мониторинга.

1. *Некоторые* пути построения автоматических информационно-измерительных систем для диагностики надежности сварных конструкций / Б. Е. Патон, И. В. Кудрявцев, А. Я. Недосека и др. // Автомат. сварка. — 1974. — № 9. — С. 1–5.
2. *15 лет назад* (по материалам статьи академика Б. Е. Патона и д-ра техн. наук А. Я. Недосеки «Концепция технической диагностики трубопроводного транспорта» в журнале «Техническая диагностика и неразрушающий контроль» № 3 за 1992 г.) // Техн. диагностика и неразруш. контроль. — 2007. — № 3. — С. 3–10.
3. *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.
4. *Paton B. E., Nedoseka A. J.* Diagnostic of designs and safety of an environment // The report on intern. conf. «The Human factor and environment». Intern. Institute of Welding, July 19–20 1999 г., Lisbon, Portugal.
5. *Harris D. O., Dunegan H. L.* Verification of structural integrity of pressure vessels by acoustic emission and periodic proof testing // Testing for prediction of material performance in structures and components, ASTM STP 515 (Philadelphia, PA: ASTM, 1972). — P. 158–170.
6. *Недосека А. Я.* Основы расчета и диагностики сварных конструкций / Под ред. Б. Е. Патона. — К.: Индпром, 2001. — 815 с.
7. *Хареев В. Г., Бородин Ю. П., Шанорев В. А.* Система комплексного диагностического мониторинга опасных производственных объектов // В мире неразруш. контроля. — 2006. — № 4. — С. 13–17.
8. *Obodovsky B., Fedchun A., Nedoseka A.* Application of a permanent acoustic emission monitoring of four ammonia storage tanks // Ammonia Technical Manual. — 2006. — P. 23–34.
9. *Правила безопасности для наземных складов жидкого аммиака (ПБ-03-182-98):* Утв. Федеральным горным и пром. надзором России, 1998. — М.: Госгортехнадзор, 2004. — 48 с.

The paper presents the technology and instrumentation for NDT of the condition of welded structures with assessment of breaking load and residual life. The predicted breaking load and residual life are determined during operation at working load. Application of the system in control of equipment at Odessa Port Plant is shown.

Поступила в редакцию 13.01.2010