

АНАЛИТИЧЕСКАЯ ВЕРИФИКАЦИЯ РЕЗУЛЬТАТОВ АКУСТИКО-ЭМИССИОННОГО МОНИТОРИНГА В КОМПЛЕКСАХ ИНТЕГРАЛЬНОГО МОНИТОРИНГА СОСТОЯНИЯ ОПАСНЫХ ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ ОБЪЕКТОВ

И.В. Разуваев, Е.А. Сучков

При обнаружении и локализации комплексами интегрального мониторинга активных источников акустической эмиссии рекомендуется выполнить дополнительный неразрушающий контроль соответствующих зон. Однако при мониторинге состояния действующих объектов это не всегда возможно по техническим причинам. В статье рассмотрены аналитические методы верификации данных АЭ-контроля в комплексе интегрального мониторинга состояния крупнотоннажного изотермического хранилища сжиженного этилена. Приведены практические результаты.

Ключевые слова: интегральный мониторинг, акустическая эмиссия, структурная целостность, аналитические методы верификации, эксплуатация по техническому состоянию.

1. ВВЕДЕНИЕ

Комплексы интегрального мониторинга технического состояния опасных производственных объектов (ОПО) являются мощным средством обеспечения их безопасной эксплуатации, в том числе при эксплуатации этих объектов по фактическому техническому состоянию. Для контроля структурной целостности ОПО, выполненных из металлов или композитных материалов, в комплексах интегрального мониторинга применяют метод акустической эмиссии [1—3].

В 1995—1996 гг. и далее с 2007 г. на изотермическом хранилище (ИХ) сжиженного этилена, позиция Е-2, в ОАО “СИБУР-Нефтехим” комплексами акустико-эмиссионного мониторинга “Ресурс-М” и интегрального мониторинга “Ресурс-2000” производства ЗАО “НПО “Алькор” зарегистрированы и локализованы активные источники акустической эмиссии (АЭ), в том числе с 2009 г. — источники с признаками течи. Карта локации источников АЭ соответствовала зонам переохлаждения на термограмме объекта. Тренды АЭ-активности коррелировали с трендами концентраций этилена в зоне локализации источников АЭ [4].

Неразрушающий контроль зон локализации источников АЭ на стенке внутреннего резервуара ИХ традиционными методами (уз. контроль, цветная дефектоскопия (ЦД), магнитопорошковая диагностика (МПД) и другие) в процессе эксплуатации невозможен. Вывод ИХ из эксплуатации является дорогостоящим процессом и сопровождается интенсивной потерей ресурса объекта [5]. Поэтому выполнение этой операции целесообразно только при наличии серьезных оснований. С другой стороны, пропуск на крупнотоннажном хранилище сжиженных углеводородных газов опасного развивающегося дефекта может привести к техногенной катастрофе.

Для альтернативной проверки результатов многолетнего непрерывного АЭ-мониторинга состояния ИХ и принятия на этой основе обоснованного решения о продолжении эксплуатации объекта либо его остановке для выполнения НК и вероятного ремонта была разработана и реализована методика аналитической верификации результатов мониторинга. Эта методика включает:

1. Статистический анализ динамики концентраций этилена в межстенном пространстве ИХ по измерениям в двух разнесенных точках пробо-

Игорь Владимирович Разуваев, генеральный директор ЗАО “Научно-производственное объединение “Алькор”. г. Дзержинск. Тел. +7 8313 252 610. E-mail: irazuvaev@alcor.nnov.ru

Евгений Анатольевич Сучков, канд. техн. наук, начальник научно-исследовательской лаборатории ЗАО “Научно-производственное объединение “Алькор”. г. Дзержинск. Тел. +7 8313 252 610. E-mail: esuchkov@alcor.nnov.ru

отбора для проверки статистической гипотезы о принадлежности выборок к одной генеральной совокупности.

2. Определение статистической значимости зависимости концентраций этилена в межстенном пространстве ИХ от уровня заполнения и давления в газовой фазе во внутреннем резервуаре.

3. Разработку математической модели динамики истечения этилена в псевдооживленный слой перлитового песка и локализацию по ней вероятной зоны истечения этилена из внутреннего резервуара в межстенное пространство ИХ. Сравнение местоположений расчетной зоны истечения этилена и зоны локализации источников АЭ комплексом мониторинга.

2. ОБЪЕКТ И РЕЗУЛЬТАТЫ МОНИТОРИНГА

2.1. Объект мониторинга

Изотермическое хранилище сжиженного этилена, позиция Е-2, представляет собой двустенный цилиндрический резервуар (рис. 1).



Рис. 1. Изотермический резервуар сжиженного этилена, позиция Е-2.

Внутренний несущий резервуар выполнен из стали 0Н6. Толщина листов стенки от 10 сверху до 12 мм внизу. По проекту диаметр внутреннего резервуара — 22 882 мм, высота цилиндрической части — 22 870 мм. Внешняя стенка выполнена из Ст3. Между внутренней и внешней стенками находится многослойная теплоизоляция (маты и перлит).

Температура сжиженного этилена в ИХ составляет около $-104\text{ }^{\circ}\text{C}$, давление в газовой фазе по регламенту достигает от 400 до 800 мм водного столба.

2.2. Результаты мониторинга

В 1993 г. на ИХ, позиция Е-2, был смонтирован комплекс акустико-эмиссионного мониторинга “Ресурс-М”. На внутренней стенке ИХ было установлено шестьдесят преобразователей акустической эмиссии (ПАЭ), размещенных в пяти горизонтальных поясах. Расстояние между поясами составляет около 5,5 м, расстояние между ПАЭ в поясе — около 6,5 м.

Впервые активные источники АЭ на стенке внутреннего резервуара были зарегистрированы комплексом мониторинга “Ресурс-М” в 1994—1996 гг. (рис. 2).

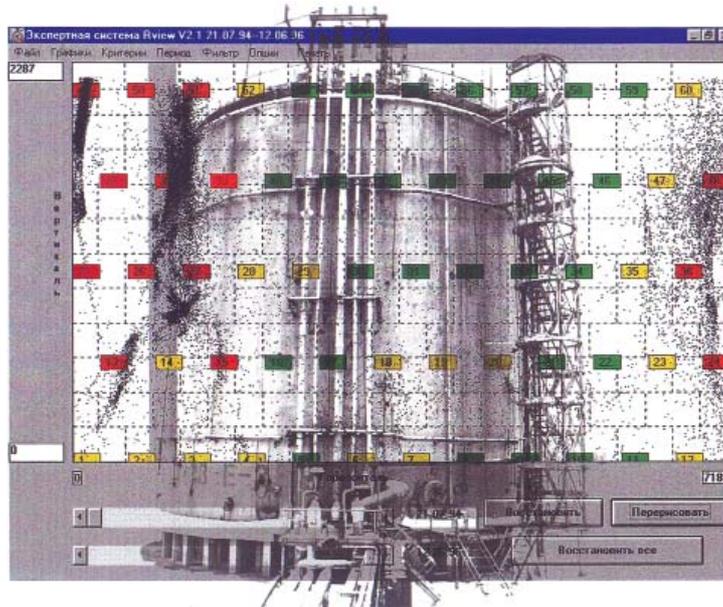


Рис. 2. Схема расположения ПАЭ и карта локации 1994—1996 гг.

Зоны локализации этих источников совпадали с зонами переохлаждения на внешней стенке, обнаруженными при тепловизионной съемке ИХ. Тренды концентрации этилена в межстенном пространстве ИХ коррелировали с трендами активности АЭ-сигналов [4].

С 2007 г. на ИХ, позиция Е-2, комплексом интегрального мониторинга серии “Ресурс-2000” (он заменил комплекс серии “Ресурс-М” в 2005 г.) в зонах локализации ранее регистрировавшихся источников АЭ стали периодически регистрироваться источники АЭ III и IV классов, в том числе с 2009 г. — источники с признаками течи.

На основании результатов мониторинга состояния ИХ с 1994 г.

(с учетом данных тепловизионной съемки, наличия корреляции трендов уровня этилена в ИХ, трендов АЭ-активности и трендов концентраций этилена в межстенном пространстве) специалистами ЗАО “НПО “Алькор” сделан вывод о возможности наличия в стенке внутреннего резервуара ИХ сквозного дефекта.

Для дополнительной проверки разработана программа испытаний ИХ без вывода объекта из эксплуатации, которая предусматривала ступенчатый подъем уровня этилена в резервуаре, вариации давления в газовой фазе при выдержках уровня с контролем концентраций продукта в межстенном пространстве и ряд других работ. Отбор проб этилена для определения его концентрации в межстенном пространстве ИХ был организован в двух точках разнесенных на расстоянии 9-ти м, на крыше ИХ. Они расположены над ПАЭ 50 и 51 со смещением в стороны ПАЭ 49 и 52 соответственно. Программа испытаний ИХ выполнена в 2009—2010 гг. [5].

Активные источники АЭ были локализованы в зонах расположения ПАЭ 38, 39, 50 и 51, то есть там же, где высокая активность проявлена еще в 1995—1996 гг., а в 2008—2009 гг. зарегистрированы источники АЭ с признаками течи. При этом активность в данной зоне (4 ПАЭ) за период испытаний была более чем вдвое выше суммарной активности по остальным пятидесяти шести ПАЭ.

Отмечена также корреляция динамики АЭ-активности в данной зоне с ростом уровня сжиженного этилена в ИХ (рис. 3).

Накопительный — Количество событий (нелоцированных)
 (с 3 мая 2010 г. 00:00:01 по 9 мая 2010 г. 14:18:01)
 Каналы: 38, 39, 50, 51.
 количество событий давление, мм вод. ст. уровень, %.
 Объект: ИХ Е-2 (RZ00009)

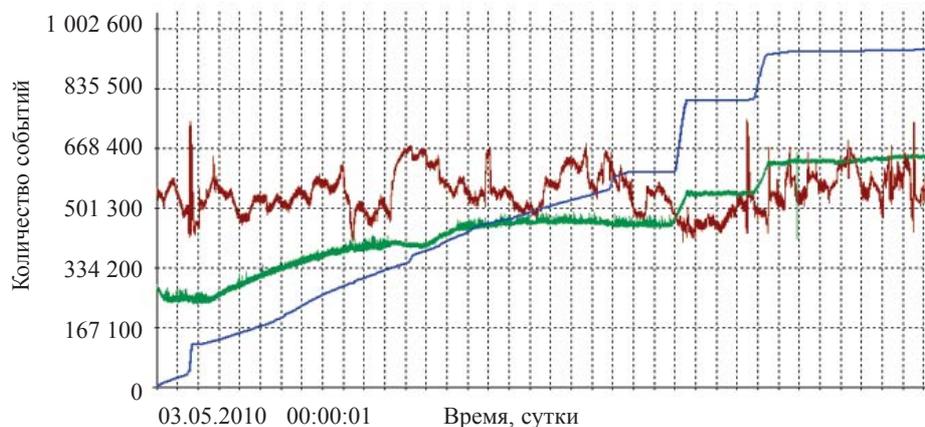


Рис. 3. График АЭ-активности в зонах ПАЭ 38, 39, 50 и 51 в период испытаний.

При этом регистрировали сигналы АЭ во время выдержки на постоянных уровнях 46, 57 и 67 % от максимального, высокую АЭ-активность при каждом повышении уровня и выдержке, а также АЭ-сигналы с высокой, свыше 95 дБ, локационной амплитудой (рис. 4).

По классическим критериям [6] такие источники относятся к IV классу опасности. Их наличие указывает на присутствие развивающейся трещины. В связи с этим предусмотренное программой испытаний дальнейшее повышение уровня сжиженного этилена в хранилище не проводили, а владельцу объекта выдали соответствующие рекомендации.

Просмотр во времени: АЭ параметры (лоцированные),
 технические параметры. Боковая поверхность
 Объект: ИХ Е-2 (RZ00009)
 (с 26.05.2010 00:00:01 по 09.06.2010 14:18:03)
 ПАЭ: 38, 39, 51,
 ■ амплитуда макс., дБ; ■ уровень, %;

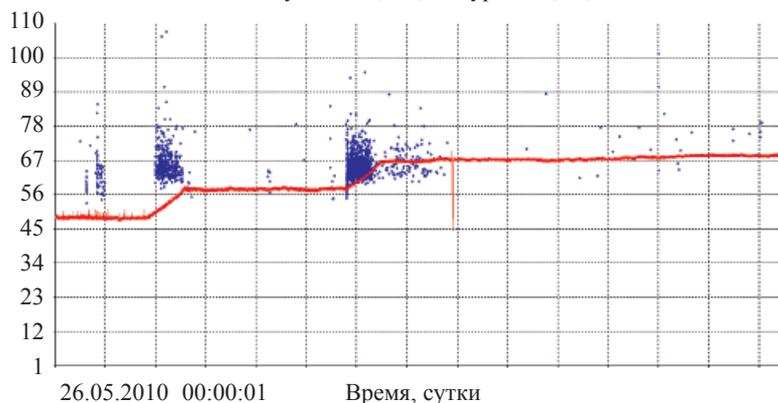


Рис. 4. Амплитуда лоцированных в зоне источников АЭ:
 синий — локационная амплитуда, дБ; красный — уровень сжиженного этилена, %.

3. МЕТОДИКА АНАЛИТИЧЕСКОЙ ВЕРИФИКАЦИИ РЕЗУЛЬТАТОВ МОНИТОРИНГА

3.1. Статистический анализ динамики концентраций этилена в межстенном пространстве ИХ в двух разнесенных точках

Цель этого анализа — проверка статистической гипотезы о принадлежности двух процессов: изменения концентрации этилена в точках 50 и 51 (рис. 5) одной генеральной совокупности. Подтверждение этой статистической гипотезы указывало бы на наличие сосредоточенного источника поступления этилена в межстенное пространство ИХ.

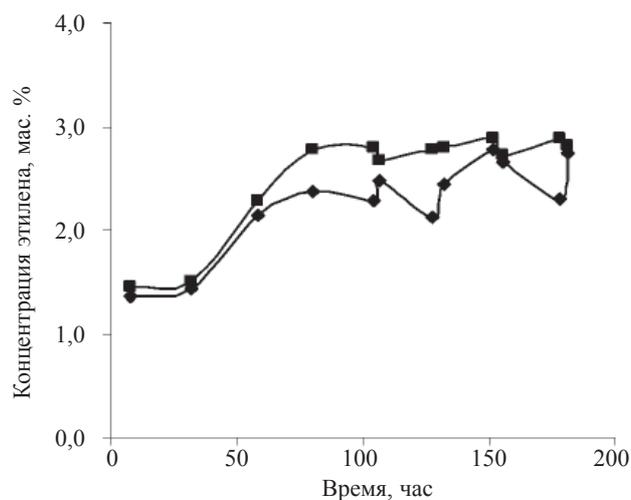


Рис. 5. Графики концентраций этилена в точках:
— ромб — точка 50; — квадрат — точка 51 т.

Проверку проводили по двум критериям: t — критерий Стьюдента (анализировали значимость различий средних значений концентрации этилена); χ^2 — критерий Пирсона (определяли статистическое соответствие двух процессов).

В результате были получены расчетные значения критериев Стьюдента ($t_{\text{расч}} = 1,316$) и Пирсона (0,511). Поскольку эти критерии по величине существенно меньше их табличных значений ($t_{\text{таб}} = 2,2$ и $30,14353$ соответственно), то можно сделать вывод о том, что оба процесса принадлежат одной генеральной совокупности. Следовательно, истечение этилена из внутренней емкости ИХ в межстенное пространство с высокой вероятностью происходит либо из одного источника, либо из кластера, размеры которого как по горизонтали, так и по вертикали существенно меньше расстояния между точками пробоотбора.

3.2. Определение статистической зависимости концентраций этилена в межстенном пространстве ИХ от уровня заполнения и давления в газовой фазе

На втором этапе статистического исследования определяли уравнение множественной регрессии, связывающее концентрацию этилена с уровнем продукта в ИХ и давлением в газовой фазе во внутреннем резервуаре. Урав-

нение множественной регрессии рассчитывали с помощью стандартных процедур Excel. В результате имеем

$$z = -0,40442 + 1,02433 \cdot x + 0,04209 \cdot y, \quad (1)$$

где z — концентрация этилена; x — уровень заполнения изотермика; y — давление в газовой фазе.

Оценка значимости коэффициентов регрессионного уравнения с помощью t -критерия Стьюдента показывает, что значимым является только уровень продукта в ИХ. Окончательное уравнение, показывающее зависимость концентрации этилена от уровня продукта в ИХ, будет выглядеть следующим образом:

$$z = -0,3933 + 1,0423 \cdot x. \quad (2)$$

Сравнение реальных и расчетных данных представлено на рис. 6.

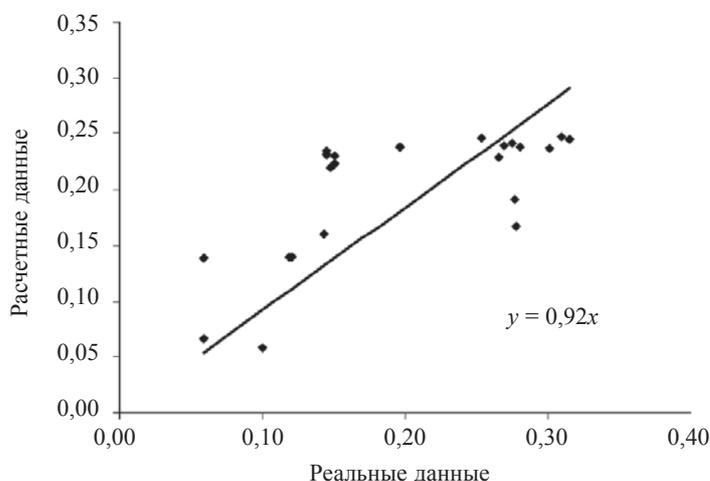


Рис. 6. Сравнение реальных и расчетных данных.

На этом этапе установлено, что зависимость концентрации газообразного этилена в межстенном пространстве от уровня сжиженного этилена во внутреннем резервуаре является статистически значимой.

3.3. Математическая модель динамики истечения этилена в псевдооживленный слой перлитового песка и определение зоны истечения

Для оценки процесса истечения этилена из внутреннего резервуара в межстенное пространство разработана математическая модель динамики движения газообразного этилена в псевдооживленном слое перлитового песка [7]. В модели учитывали процесс диффузии и перенос этилена продувочным газом—азотом.

Движение газообразного этилена через псевдооживленный слой перлита описывается уравнением Навье—Стокса [8]

$$\frac{\partial \mathbf{v}}{\partial t} = -(\mathbf{v} \cdot \Delta) \mathbf{v} + w \cdot \Delta \mathbf{v} - \frac{1}{\rho} \nabla p + \mathbf{f}, \quad (3)$$

где Δ — оператор Лапласа; ∇ — оператор Гамильтона; t — время; w — коэффициент кинематической вязкости; ρ — плотность; p — давление; $\mathbf{v} = (v^1, \dots, v^n)$ — векторное поле скоростей; \mathbf{f} — векторное поле массовых сил.

Для кипящего слоя характерны низкие скорости движения оживающего агента, что не требует учета эффекта сжимаемости газа, так как в данном случае имеем дело с квазистационарным процессом, поэтому частные производные по времени также можно не учитывать, поскольку они близки к нулю. При этих предположениях задача истечения газа сводится к задаче Эйлера с соответствующими граничными условиями

$$(\mathbf{v} \cdot \Delta)\mathbf{v} = g - \frac{1}{\rho} \nabla p. \quad (4)$$

В данном случае под плотностью непрерывной среды понимается порозность (относительная доля пустот) кипящего слоя. Движение оживающего агента через слой сыпучего материала описывается уравнением Дарси

$$\mathbf{v} = -k \cdot \nabla p, \quad (5)$$

где k — коэффициент пропорциональности.

Поскольку радиальные размеры межстенного пространства ИХ значительно уступают линейным и скорость движения азота в межстенном пространстве низкая, то движение газа можно считать потенциальным. В качестве потенциала здесь выступает давление в газовой фазе. Поэтому задача о движении оживающего агента в слое сыпучего материала сводится к одномерному уравнению

$$\frac{dp}{dt} = g - k \cdot p, \quad (6)$$

решением которой являются выражения вида:

$$p(x) = \frac{g - C \cdot e^{-k \cdot x}}{k}; \quad v(x) = g/k + C \cdot e^{-k \cdot x}/k, \quad (7)$$

где C (постоянная интегрирования) и k (коэффициент пропорциональности) определяются из граничных условий (давление в газовой фазе внизу иверху межстенного пространства ИХ).

В поток оживающего агента из внутренней емкости через микротрещину длиной l , расположенную на расстоянии h от верхнего утора, поступает этилен, молекулы которого диффундируют в потоке оживающего агента. Процесс диффузии газообразного этилена в оживающем агенте описывается уравнением диффузии с произвольным коэффициентом сноса

$$\frac{\partial c}{\partial t} = D(\mathbf{x}) \cdot \frac{\partial^2 c}{\partial \mathbf{x}^2} - v(\mathbf{x}) \cdot \frac{\partial c}{\partial \mathbf{x}}, \quad (8)$$

где c — концентрация этилена, мас. %; D — коэффициент диффузии.

Коэффициентом сноса в данном случае является скорость оживающего агента—азота. Преобразование фазового пространства [8] можно перейти к уравнению диффузии с постоянным коэффициентом, фундаментальное решение которого [9] имеет выражение вида

$$c(z, l) = \frac{1}{2\sqrt{Dl + C_1}} \cdot e^{-\frac{z^2}{4D^2l + C_2}}, \quad (9)$$

где z — новая горизонтальная координата на высоте микротрещины, полученная после преобразования фазового пространства; l — новая вертикальная координата (расстояние от микротрещины).

Полученное решение используют для параметрической идентификации математической модели. Параметры модели (расстояние центра зоны утечки от верхнего утора, ее начало и длина, а также значение коэффициента диффузии) рассчитаны методом наименьших квадратов. В качестве штрафной функции взята сумма квадратов отклонений расчетных и реальных значений концентрации этилена. Найденные параметры математической модели были использованы для определения поля концентраций этилена в межстенном пространстве (рис. 7).

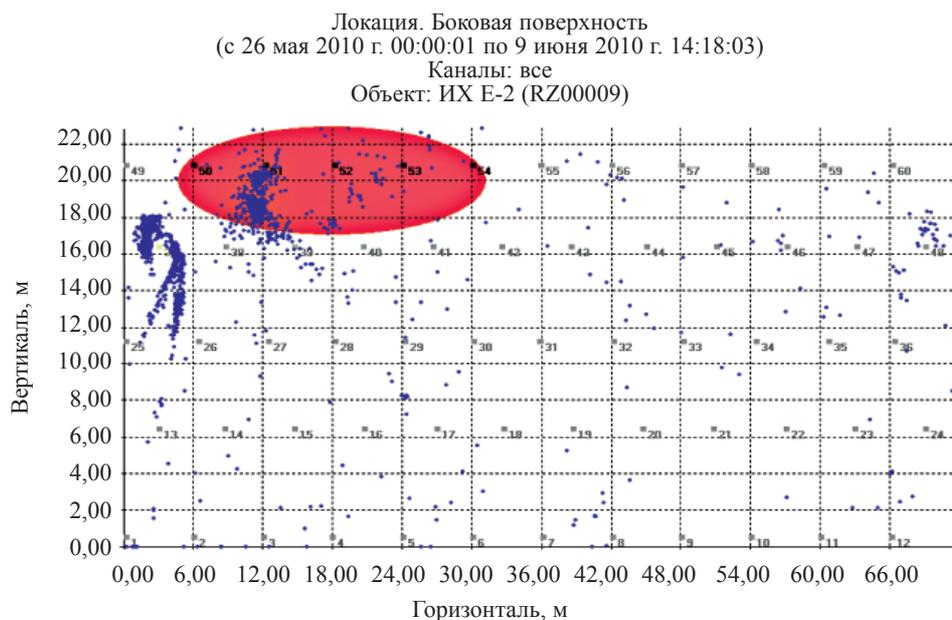


Рис. 7. Расположение расчетной зоны истечения на карте локации: красный эллипс — расчетная зона истечения; синие точки — лоцированные источники АЭ; пронумерованные черные квадраты — места и номера ПАЭ.

Точность полученной математической модели позволила определить зону расположения утечки с вероятностью 0,95.

Таким образом, зона локализации комплексом мониторинга “Ресурс-2000” опасных источников АЭ в районе ПАЭ 38, 39, 50 и 51 находится в границах рассчитанной по математической модели зоны истечения.

4. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ПРОВЕРКА МЕТОДИКИ

Экспериментальная проверка разработанной методики была выполнена изнутри резервуара на остановленном, растепленном и дегазированном объекте. В зоне локализации источников истечения и активных источников АЭ под контролем компетентного представителя собственника объекта высококвалифицированными специалистами независимых организаций и разными приборами были выполнены у.з. контроль, у.з. томография и ЦД сварных швов.

Ультразвуковой контроль и у.з. томография зарегистрировали наличие несплошностей, расположенных в одном из сварных швов на всю глубину (рис. 8 и 9) на участке протяженностью около 1,2 м.

Результаты ЦД также показали наличие в вышеуказанной зоне недопустимых дефектов.

Таким образом, разработанная методика аналитической верификации результатов акустико-эмиссионного мониторинга была подтверждена экспериментально.

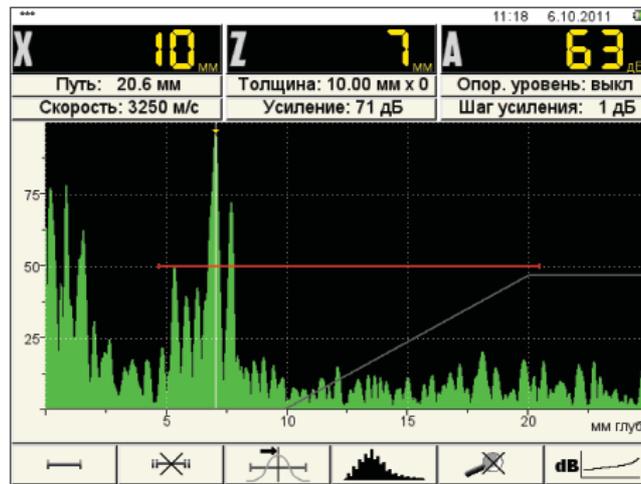


Рис. 8. Ультразвуковой контроль вертикального сварного шва в зоне локализации источников АЭ III и IV классов опасности.

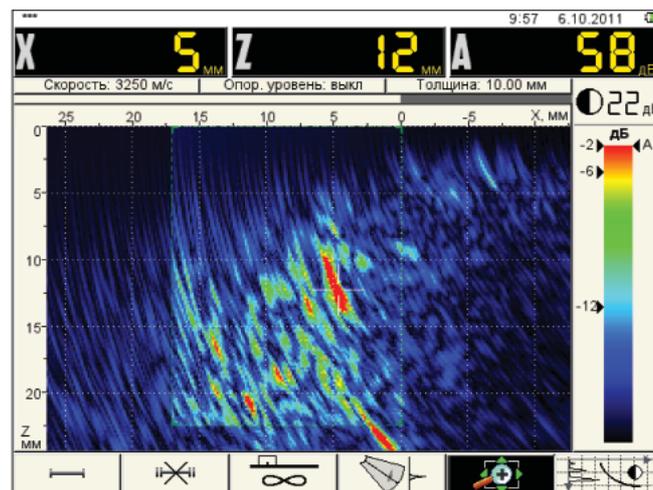


Рис. 9. Ультразвуковая томограмма участка вертикального сварного шва в зоне локализации источников АЭ III и IV классов опасности.

5. ВЫВОДЫ

Подтверждены данные комплексов мониторинга “Ресурс-М” и “Ресурс-2000” о наличии и месте расположения протяженного сквозного дефекта в стенке внутреннего резервуара ИХ на основе:

- статистического анализа динамики концентраций этилена в межстенном пространстве ИХ по измерениям в двух разнесенных точках пробоотбора;

- определения статистической зависимости концентраций этилена в межстенном пространстве ИХ от уровня заполнения и давления в газовой фазе во внутреннем резервуаре;

- математического моделирования процесса истечения газообразного этилена из внутреннего резервуара в межстенное пространство с учетом геометрии хранилища и координат точек пробоотбора;

- аналитической локализации зоны истечения.

Разработанная аналитическая методика верификации данных акустико-эмиссионного контроля в комплексах интегрального мониторинга может быть применена для получения адекватной оценки фактического технического состояния опасных производственных объектов по результатам мониторинга и принятия оптимального решения о перечне и сроках выполнения компенсирующих мероприятий по предотвращению аварий и техногенных катастроф.

Авторы выражают благодарность эксперту, начальнику лаборатории НК ОАО «НИИК» Глаголеву В.Н.; дефектоскопистам этой лаборатории — лауреату II Российского конкурса специалистов в области неразрушающего контроля Ю.А. Мовчану (уз. контроль) и К.Ю. Чехову (контроль проникающими веществами); техническому директору ООО «АКС-Сервис» В.В. Силину за высокую квалификацию и профессиональное владение передовыми средствами неразрушающего контроля.

ЗАО «НПО «Алькор»
г. Дзержинск

Поступила в редакцию
24 июля 2013 г.

ЛИТЕРАТУРА

1. Assuring Mechanical Integrity of Refinery Equipment Through Global On-Stream Inspection. Office of Industrial Technologies U.S. Department of Energy, Washington, D.C. 20585.
2. ASTM E 1139-07 Standard Practice for Continuous Monitoring of Acoustic Emission from Metal Pressure Boundaries.
3. Tscheliesnig P., Lackner G. Maintenance driven by Acoustic Emission Monitoring.— Proceedings of the Sixth International Conference on Condition Monitoring and Machinery Failure Prevention Technologies, CM 2009 and MFPT 2009.— Dublin, Ireland, 2009.
4. Razuvaev I.V., Klochkov A.S., Pichkov S.N., Derjugin A.V. Continuous Acoustic Emission Monitoring of the Bulk Isothermal Vessels In-Service.— Proceedings of the 23rd European Conference on Acoustic Emission Testing.— Vien, Austria, 1998.
5. Азаров Н.И., Богатов Н.Д., Массарский Ю.З., Пичков С.Н., Разуваев И.В. Опыт обеспечения промышленной безопасности изотермических хранилищ сжиженных газов при их эксплуатации по фактическому техническому состоянию.— Безопасность труда в промышленности, 2011, № 5, с. 7—10.
6. Бигус Г.А., Даниев Ю.Ф. Техническая диагностика опасных производственных объектов.— М.: Наука, 2010.
7. Кафаров В.В., Дорохов И.Н., Сучков Е.А. Движение оживающего агента через слой сыпучего материала в системе псевдооживленный слой-фонтан.— ДАН СССР, 1986, т. 290, № 1, с. 166—169.
8. Лойцянский Л.Г. Механика жидкости и газа. 7-е изд., испр.— М.: Дрофа, 2003.
9. Прохоров Ю.В., Розанов Ю.А. Теория вероятностей.— М.: Наука, 1967.
10. Владимиров В.С. Уравнения математической физики.— М.: Наука, 1981.