

DOI 10.5862/JEST.219.20

УДК 621.793:620.199:001.18

В.В. Носов, С.В. Номинас, Н.А. Зеленский

ОЦЕНКА ПРОЧНОСТИ СОСУДОВ ДАВЛЕНИЯ НА ОСНОВЕ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ЯВЛЕНИЯ АКУСТИЧЕСКОЙ ЭМИССИИ

V.V. Nosov, S.V. Nominas, N.A. Zelensky

PRESSURE VESSEL STRENGTH ASSESSMENT BASED ON ACOUSTIC EMISSION PARAMETERS

На примере производственных испытаний абсорбера очистки сероводорода и лабораторных испытаний колец, моделирующих корпуса подводных аппаратов, оптимизируется расчет и анализируется диагностическая ценность вытекающих из микромеханической модели акустической эмиссии гетерогенных материалов, связанных с ресурсом акустико-эмиссионных показателей прочности. При рассмотрении метрологических аспектов такого определения используется диагностическая ценность временных зависимостей параметров акустической эмиссии и их статистических распределений. Показана связь между диагностическими параметрами и ресурсом. Оптимизируется расчет диагностического параметра путем выбора информативного первичного параметра акустической эмиссии. Оптимизация осуществляется в информационной форме. Показана устойчивость рассмотренных диагностических параметров к дестабилизирующим факторам.

АКУСТИЧЕСКАЯ ЭМИССИЯ; ОЦЕНКА ПРОЧНОСТИ; СОСУДЫ ДАВЛЕНИЯ; МИКРОМЕХАНИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ; ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ДАННЫЕ.

Exemplifying production tests of a hydrogen sulfide purification absorber and laboratory tests of rings which simulate the case of underwater vehicles, the authors optimized calculation and analyzed the diagnostic value of heterogeneous materials related to the resource of the acoustic emission strength, which resulted from the acoustic emission micromechanical model. Considering metrological aspects of this definition, the researchers used the diagnostic value of the acoustic emission time dependence parameters and their statistical distributions. The paper shows the relationship between diagnostic parameters and the resource, the optimized calculation of the diagnostic parameter by selecting an informative acoustic emission primary parameter. This optimization is used in the information form. The paper presents the resistance of the considered diagnostic parameters to destabilizing factors.

ACOUSTIC EMISSION; STRENGTH ASSESSMENT; PRESSURE VESSELS; MICROMECHANICAL MODEL; EXPERIMENTAL DATA.

Одной из главных проблем эксплуатации сварных соединений сосудов давления является слабая прогнозируемость их поведения, что привело к необходимости разработки методов диагностирования состояния. Базой этого должно служить развитие экспериментальных методов фиксации повреждений, прогнозирование накопления повреждений, развитие положений механики разрушения, использование результа-

тов микроструктурных исследований и физики прочности. В качестве одного из таких методов был предложен метод оценки ресурса технических объектов на основе использования явления акустической эмиссии (АЭ) и микромеханической модели временных зависимостей ее параметров [1–9]. Применение метода акустической эмиссии для оценки состояния опасных объектов обязано инструкциями Ростехнадзора

(в частности, ПБ 03–593–03, ГОСТ Р 55045–2012, ГОСТ 27655–88, РД 03–299–99 и др.).

Цель данной работы — апробация и корректировка методики АЭ для оценки прочности применительно к решению задач диагностики состояния сосудов давления.

Методика оценки ресурса

Предложенная модель АЭ детерминированно описывает процесс накопления повреждений в структурно неоднородном материале в условиях статистического изменения звучащего объема на первой стадии разрушения и связь вида распределений параметров АЭ с напряжениями возле трещины на второй стадии разрушения. Модель имеет иерархическую структуру (рис. 1), объединяет физический и статистический подходы к исследованию и использованию явления АЭ. Определив параметры этой модели, можно рассчитать различные показатели прочности исследуемого объекта и его ресурс. При рассмотрении метрологических аспектов такого определения учитывается вид временных зависимостей параметров АЭ и их статистических распределений. Здесь ξ — информативный параметр АЭ (число импульсов, суммарная АЭ, суммарная амплитуда АЭ); k_{AE} — акустико-эмиссионный коэффициент («звучащий» объем); $C(t)$ — зависимость концентрации микротрещин от времени t ; $\Psi(\omega)$ — функция плотности распределения

параметра $\omega = \gamma\sigma/KT$ (параметр прочностного состояния структурного элемента материала) по структурным элементам контролируемого объема V ; $\Theta = \tau_0 \exp[U_0/(KT) - \omega]$ — время разрушения структурного элемента; τ_0 — период атомных колебаний (относительно стабильная величина); T — абсолютная температура; μ — нижняя граница изменения величины ω ; $\Phi(\Delta t, f, U)$ — плотность вероятности распределения сигналов АЭ по интервалам Δt (паузы) между ними, амплитуде U и частоте f ; $\Delta\omega$ — диапазон рассеяния параметра ω ; U_0 — энергия активации процесса разрушения (относительно стабильная величина); C_0 — начальная концентрация структурных элементов в материале до разрушения; γ — структурно-чувствительный параметр; σ — растягивающее напряжение; K — постоянная Больцмана.

Входящая в микромеханическую модель (рис. 1) параметров АЭ зависимость концентрации микротрещин от времени — $C(t)$ — при однородном разрушении представима в виде

$$C(t) = C_0 KT \exp[(\gamma\sigma t - U_0)/(KT)] / (\tau_0 \gamma \sigma);$$

$$\ln(C(t)) = \ln\left(\frac{C_0 KT}{\tau_0 \gamma \sigma}\right) + ((\gamma\sigma t - U_0)/(KT));$$

$$\ln\left(\frac{C(t) \tau_0 \gamma \sigma}{C_0 KT}\right) = (\gamma\sigma t - U_0)/(KT);$$

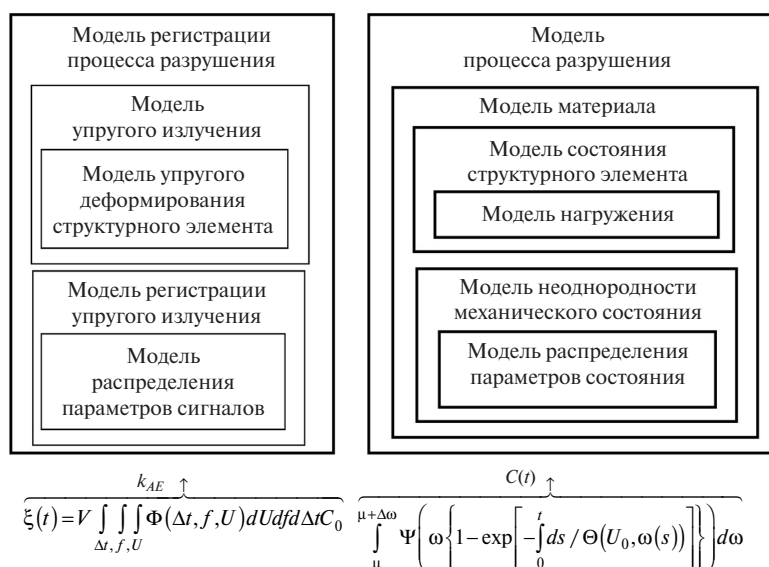


Рис. 1. Структура и вид микромеханической модели АЭ

$$KT \ln \left(\frac{C(t) \tau_0 \dot{\gamma}}{C_0 KT} \right) = \dot{\gamma} t - U_0;$$

$$t = \frac{U_0 - KT \ln \left(\frac{C_0 KT}{C \tau_0 \dot{\gamma}} \right)}{\dot{\gamma}}. \quad (1)$$

Поскольку $C(t^*) = C^*$ и $C^* = 0,01C_0$, где C^* — критическая концентрация микротрещин, то время до разрушения τ^* и предел прочности σ^* определяются уравнениями

$$\tau^* = \frac{U_0 - KT \ln \left(\frac{C_0 KT}{C^* \tau_0 \dot{\gamma}} \right)}{\dot{\gamma}};$$

$$\sigma^* = \tau^* \dot{\gamma};$$

$$\sigma^* = \frac{U_0 - KT \ln \left(\frac{C_0 KT}{C^* \tau_0 \dot{\gamma}} \right)}{\gamma} =$$

$$= \frac{U_0 - KT \ln \left(\frac{KT}{0,01 \tau_0 \dot{\gamma}} \right)}{\gamma}. \quad (2)$$

Участки временных зависимостей числа N_Σ импульсов АЭ на этапе однородного разрушения при равномерном нагружении объекта с постоянной скоростью $\dot{\sigma}$ роста напряжения σ описываются выражением

$$N_\Sigma(t) = k_{AE} C_0 KT \times$$

$$\times \exp[(\dot{\gamma} t - U_0)/(KT)] / (\tau_0 \dot{\gamma}). \quad (3)$$

Тогда логарифм числа импульсов равен

$$\ln(N_\Sigma(t)) = \ln(k_{AE} C_0 KT) +$$

$$+ ((\dot{\gamma} t - U_0)/(KT)) - \ln(\tau_0 \dot{\gamma}). \quad (4)$$

Откуда следует производная по времени t :

$$\frac{d}{dt} \ln(N_\Sigma(t)) = \frac{\dot{\gamma}}{KT} = X_{AE}. \quad (5)$$

Производная от $\ln N_\Sigma(t)$ по напряжениям σ равна

$$Y_{AE} = \dot{\gamma}/KT. \quad (6)$$

Из (1–6) видно, что диагностические параметры X_{AE} и Y_{AE} связаны со временем до разрушения и имеют смысл параметров прочностно-

го состояния. Также видно, что $N_\Sigma(t)$ в (3) имеет вид $\xi(t)$, т. е. является его частным случаем.

Ресурсы контролируемых зон определяются по следующим формулам:

исходный ресурс (с момента образования дефекта)

$$N_c = N_B / \exp(W_{AE}), \quad (7)$$

где $W_{AE} = Y_{AE} \cdot \sigma = k Y_{AE}$, $F_{\text{раб}} = d \ln \xi / d K_n \approx \omega$; $K_n = F_i / F_{\text{раб}}$ — коэффициент нагрузки; F_i , $F_{\text{раб}}$ — диагностическая и рабочая нагрузки; N_B — характеристический параметр материала и вида сварного соединения, температуры и частоты его нагружения. Величину N_B определяют по формуле

$$N_B = \exp(\ln N_G + \sigma_R Y_R), \quad (8)$$

где N_G — базовое число циклов, соответствующих перегибу кривой усталости ($2 \cdot 10^6$); σ_R — предел выносливости при заданном коэффициенте асимметрии R цикла рабочих напряжений; при отсутствии данных принимаем $R = -1$ (двухфазные ферритно-мартенситные стали удовлетворительно свариваются методом точечной сварки. Предел выносливости при знакопеременном изгибе составляет для сварного шва и основного металла ($\sigma^* = 550$ МПа) соответственно 317 и 350 МПа, т. е. 50 и 60 % от σ^* основного металла [10]); Y_R — угловой коэффициент кривой усталости, представленной в полулогарифмических координатах (для стали 09Г2С равен $0,035 - 0,046$ МПа $^{-1}$). По кривой усталости для стали 09Г2С также находим $N_B = 10^{10}/1,58$.

Параметр N_B оказывается универсальной постоянной, поскольку выражается через относительно устойчивые величины

$$N_B = \tau_0 / \omega_p \exp[U_0/(KT)],$$

где ω_p — период циклического нагружения; *минимальный остаточный ресурс*

$$N_{\text{ост}} = N_B / \exp W_{AE} - N_{\text{пр}}, \quad (9)$$

где $N_{\text{пр}}$ — фактическое число циклов предварительного нагружения.

Знание величин разрушающего σ^* и рабочего $\sigma_{\text{раб}}$ напряжений позволяет рассчитать коэффициент запаса статической прочности

$$[S]_{\text{ст}} = \sigma^* / \sigma_{\text{раб}}. \quad (10)$$



Производственные испытания

Рассмотрим результаты АЭ-контроля прочности абсорбера очистки сероводорода К-2. На колонну, состоящую из восьми поясов сваренных встык листов были установлены 33 датчика АЭ, с помощью которых снимались значения первичных параметров АЭ (количество и время регистрации импульса, его амплитуда и количество выбросов в каждом импульсе). Наибольшее количество датчиков было установлено на самом потенциально опасном нижнем поясе (№8 на рис. 2).

Обработке подвергались две группы результатов регистрации сигналов АЭ, отличающиеся признаками отбраковки шумовых сигналов (полный и сокращенный наборы АЭ-сигналов). В первой группе опытов отбрасывались низкоамплитудные сигналы, а во второй из рассмотрения были исключены сигналы со слишком большим количеством выбросов. С целью нахождения оптимального метода отбраковки по обеим группам результатов испытаний построены графики зависимости натурального логарифма информативного параметра АЭ ξ от времени (рис. 3, а). В качестве информативных параметров рассматривались количество сигналов, амплитуда сигналов, количество выбросов, произведения количества выбросов на амплитуду сигнала. По графикам были определены параметры X_{AE} и Y_{AE} как отношения приращения логарифма параметра к приращению времени (для X_{AE}) или напряжений (для Y_{AE}), рассчитанных по формуле Лапласа при известном давлении в абсорбере (рис. 3, б). Нагрузка объекта контроля производилась в соответствии с инструкциями, предусматривающими равномерное нагружение сосуда до рабочей нагрузки — давления 50 атм.

При неявных результатах диагностирования метод АЭ рекомендуется использовать совместно с другими методами неразрушающего контроля, в частности ультразвуковым (УЗК, см. рис. 2). При этом информативным УЗК-параметром степени опасности дефекта выступает его максимальный эквивалентный размер (площадь расслоения), величина которого не должна превышать некоторое допустимое значение. Поэтому установление связи между УЗК-и АЭ-параметрами диагностически представляет большой практический интерес.

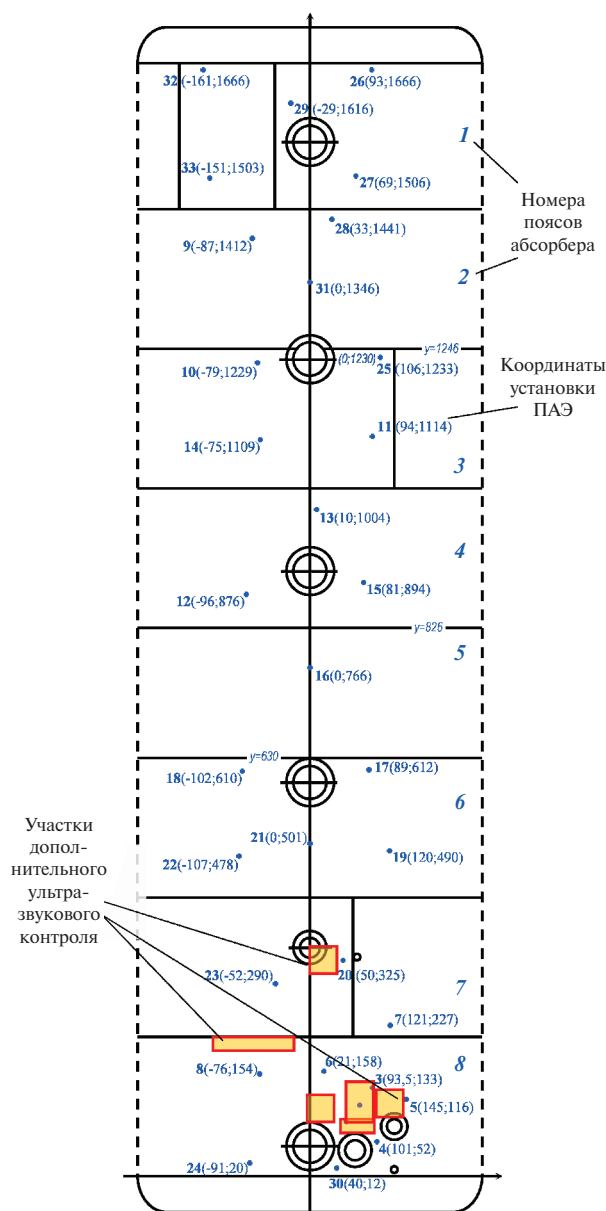


Рис. 2. Координаты расположения ПАЭ, номера поясов колонны и расположения участков дополнительного ультразвукового контроля К-2

В результате обработки первичной АЭ-информации, были определены параметры X_{AE} и Y_{AE} для каждого датчика; данные по каждому датчику сгруппированы по поясам, после чего определены ресурс, коэффициенты запаса прочности каждого пояса, коэффициенты корреляции их значений с площадью расслоения, выявленной с помощью УЗК, и номером пояса, коррелирующим с ресурсом (табл. 1, 2).

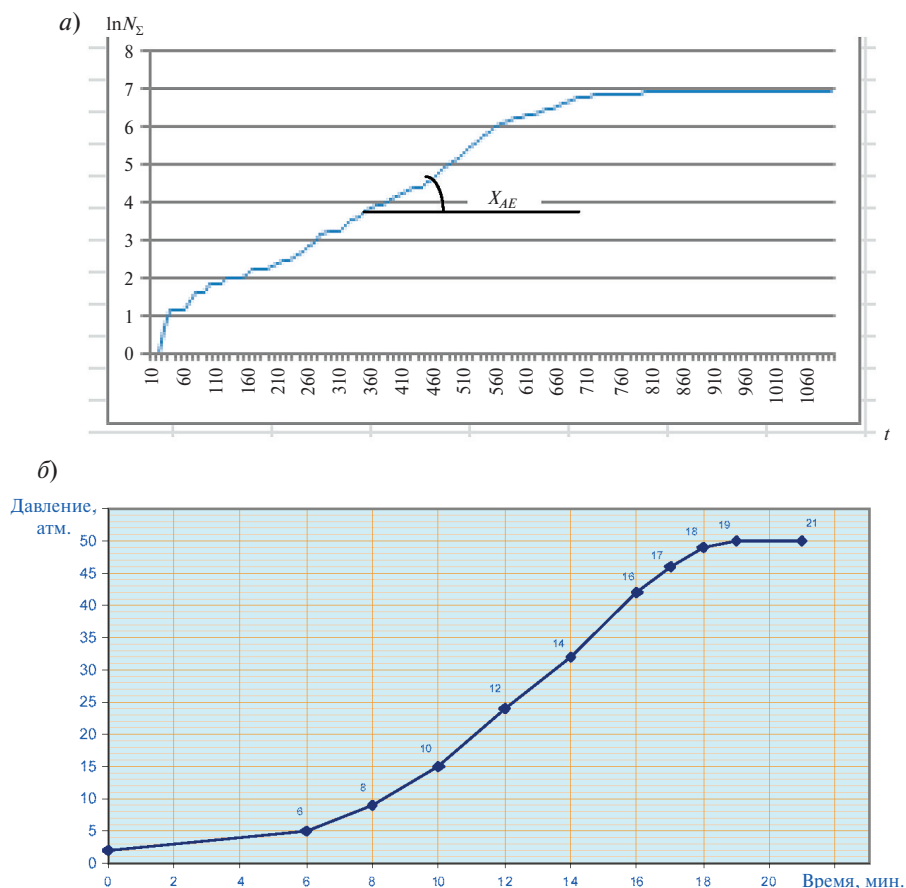


Рис. 3. Типичный вид временной зависимости логарифма числа импульсов АЭ одного из каналов (а) и график нагрузки (б) абсорбера очистки сероводорода

Таблица 1

Корреляция основных параметров контроля с номером пояса

| Параметр, по которому определяется X_{AE} | N_{cp} | $X_{AE\text{cp}}, \text{с}^{-1}$ | $X_{AE\text{макс}}, \text{с}^{-1}$ | Минимальный коэффициент запаса статической прочности | Остаточный ресурс максимальный | Остаточный ресурс минимальный |
|---|----------|----------------------------------|------------------------------------|--|--------------------------------|-------------------------------|
| <i>Полный набор сигналов АЭ</i> | | | | | | |
| Количество импульсов | 0,893 | 0,984 | 0,909 | −0,85 | −0,955 | −0,955 |
| Суммарная амплитуда сигналов | 0,893 | 0,967 | 0,942 | −0,815 | −0,964 | −0,951 |
| Количество выбросов | 0,893 | 0,752 | 0,969 | −0,597 | −0,837 | −0,834 |
| Произведение количества выбросов на амплитуду сигнала | 0,893 | 0,736 | 0,646 | −0,602 | −0,845 | −0,845 |
| <i>Сокращенный набор сигналов АЭ</i> | | | | | | |
| Количество импульсов | 0,889 | 0,973 | 0,511 | −0,604 | −0,664 | −0,662 |
| Суммарная амплитуда сигналов | 0,889 | 0,442 | −0,233 | −0,575 | −0,331 | −0,33 |

Таблица 2

Корреляция площади расслоения с параметром X_{AE} и суммарным количеством импульсов $N_{сумм}$

| Параметр, по которому определяется X_{AE} | $A - X_{AE}$ | $A - N_{сумм}$ |
|---|--------------|----------------|
| <i>Полный набор сигналов АЭ</i> | | |
| Количество импульсов | 0,842 | 0,621 |
| Суммарная амплитуда сигналов | 0,85 | 0,621 |
| Количество выбросов | 0,851 | 0,621 |
| Произведение количества выбросов на амплитуду сигнала | 0,851 | 0,621 |
| <i>Сокращенный набор сигналов АЭ</i> | | |
| Количество импульсов | 0,839 | 0,793 |
| Суммарная амплитуда сигналов | 0,823 | 0,793 |

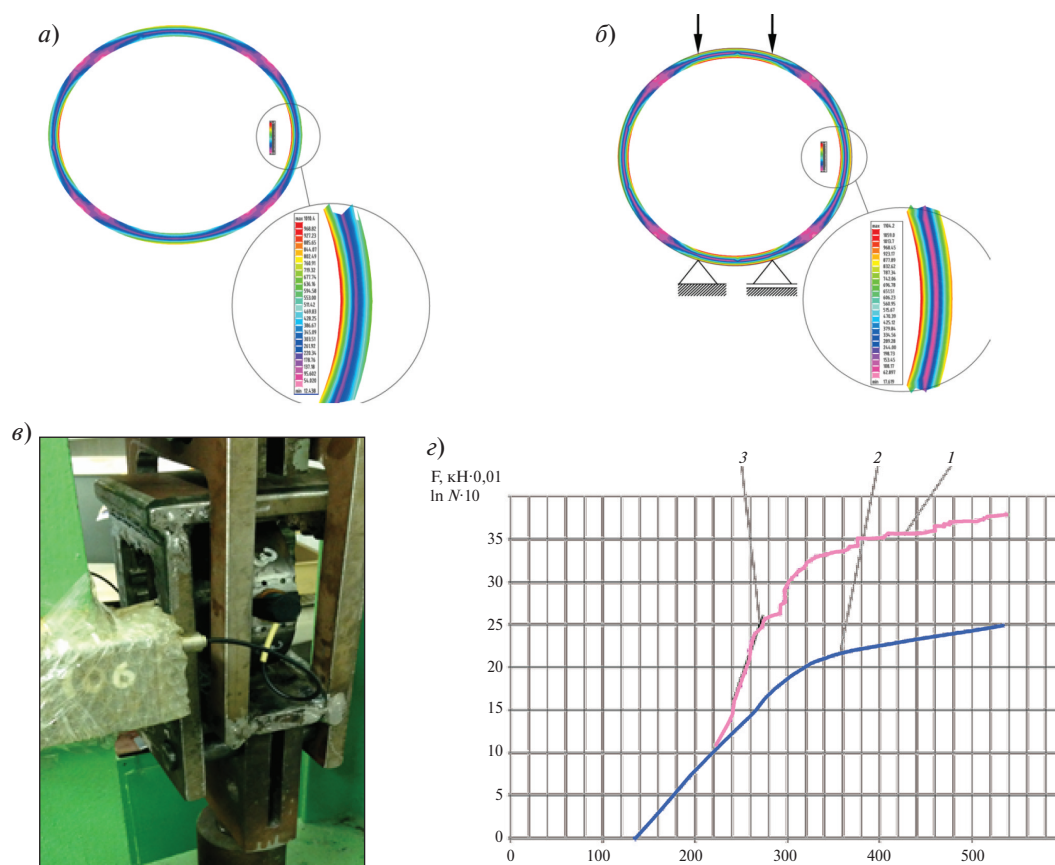


Рис. 4. Результаты исследования сжимаемой оболочки:

распределение напряжений в оболочке под действием гидростатической нагрузки (а); под действием сил распределенных по кольцу (б); в — нагружающее устройство с захватами во время проведения экспериментов; г — зависимость логарифма числа импульсов (1), нагрузки (2) от времени и участок упругого кинетически однородного разрушения (3) на примере образца 1

В опытах при сокращенном наборе АЭ-сигналов с определением X_{AE} и ресурса по количеству сигналов были получены удовлетворительные значения корреляции (корреляция среднего X_{AE} с номером пояса равна 0,973, максимального остаточного ресурса — 0,664; коэффициент корреляции площади расслоения с параметром X_{AE} равен 0,839).

Несколько лучшие результаты были получены при полном наборе АЭ-сигналов с определением X_{AE} и ресурса по суммарной амплитуде сигналов (корреляция среднего X_{AE} с номером пояса — 0,967, максимального остаточного ресурса — 0,964, корреляция площади расслоения с параметром X_{AE} — 0,85).

Кроме описанных результатов, для подтверждения возможности применения данной методики оценки состояния сжимаемых сосудов давления (корпус подводных аппаратов) были проведены испытания на образцах, которые представляли собой замкнутые кольца, к которым прикладывалась сжимающая нагрузка (рис. 4, а, б). Кольца — это модель прочного корпуса подводного аппарата, который также относится к сосудам давления. Каждый образец был изготовлен из четырех сегментов сваренных между собой электродом марки 08Г2С, материал сегментов — сталь марки Ст3. Сварные швы располагались таким образом, чтобы они находились в зоне максимальных напря-

жений. Было изготовлено четыре образца с различными искусственными дефектами в сварных швах (отверстия диаметром 4 мм) и один без дефектов. Образец помещался между захватами; с одной стороны между сварными швами к нему подключили датчик акустической эмиссии (табл. 3). Нагружение образцов и результаты регистрации АЭ представлены на рис. 4 в, г.

Выводы

Показана информативность предложенных диагностических показателей для распознавания состояния и оценки ресурса разных вариантов нагружаемых сосудов давления в условиях присутствия различным образом фильтруемых помех регистрации сигналов АЭ. Наиболее информативным является определение диагностических параметров и ресурса по суммарной амплитуде сигналов. Корреляция значений диагностических параметров при различных методах фильтрации сигналов АЭ удовлетворительна, что говорит об их устойчивости к дестабилизирующим факторам. Эффективность применения информативного диагностического показателя проверена для объектов, нагружаемых как внешним, так и внутренним приложением нагрузки, что может быть использовано для разработки методики неразрушающих испытания подводных аппаратов.

Таблица 3

Степень опасности дефектов по параметру X_{AE}

| Степень опасности дефектов | Номер образца | Дефекты образца | X_{AE} , 1/с | Максимальные напряжения вблизи дефектов, МПа |
|--|---------------|---|----------------|--|
| 1 | 5 | Два несквозных отверстия внутри (4 мм и 3 мм) | 0,0364 | 268 |
| 2 | 4 | Два несквозных отверстия снаружи (2,4 мм и 3,2 мм); свищ 1 мм | 0,0322 | 178 |
| 3 | 1 | Два сквозных отверстия | 0,0282 | 253 |
| 4 | 3 | Два несквозных отверстия (внутри 3,5 мм, снаружи 3 мм) | 0,0272 | 274 |
| 5 | 2 | Без дефектов | 0,0063 | 177 |
| Коэффициент корреляции между X_{AE} и σ_{max} | | | | 0,9476 |



СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Носов В.В. Диагностика машин и оборудования: Учебное пособие. СПб.: Лань, 2012. 2-е изд. перераб. и доп. 384 с.
2. Петров В.А. Башкарёв А.Я., Веттегрень В.И. Физические основы прогнозирования долговечности конструкционных материалов. СПб.: Политехника, 1993. 475 с.
3. Носов В.В. Методика акустико-эмиссионного контроля прочности и прогнозирования остаточного ресурса металлических конструкций // В мире неразрушающего контроля. 2014. № 1. С. 64–66.
4. Носов В.В. Методика определения информативных параметров акустической эмиссии // Дефектоскопия. 1998. № 5. С. 92–98.
5. Носов В.В., Бураков И.Н. Оценка прочности сосудов давления методом акустической эмиссии // Научно-технические ведомости СПбГТУ. 2003. №3 (33). С. 210–218.
6. Носов В.В. Методология акустико-эмиссионной оценки прочности как основ эффективности неразрушающего контроля // В мире неразрушающего контроля. 2014. №3 (65). С. 7–13.
7. Носов В.В. Потапов А.И., Гомера В.П. Акустический контроль состояния сосудов давления // Материалы 5-й международной научно-технической конференции «Современные методы и приборы контроля качества и диагностики состояния объектов», Белоруссия, Могилев, 24–25 сентября 2014. С. 66–68.
8. Носов В.В., Селютин С.В. Совершенствование методики оценки сосудов давления на основе использования явления акустической эмиссии // Неделя науки СПбГПУ: материалы научно-практической конференции с международным участием. Институт металлургии, машиностроения и транспорта СПбГПУ. Ч. 1. СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2014. С. 98–100.
9. Носов В.В. Автоматизированная оценка ресурса образцов конструкционных материалов на основе микромеханической модели временных зависимостей параметров акустической эмиссии // Дефектоскопия. 2014. № 12. С. 24–35.
10. Сталь марки 09Г2С. URL: http://www.metallischekiy-portal.ru/marki_metallov/stk/09G2S (Дата обращения: 23.05.2015)

REFERENCES

1. Nosov V.V. Diagnostika mashin i oborudovaniya. Uchebnoye posobiye. [Diagnostics of machines and equipment. Textbook] SPb.: «Lan» Publ., 2012. Vol. 2. S. 384 (rus.)
2. Petrov V.A. Bashkarev A.Ya., Vettegren V.I. Fizicheskiye osnovy prognozirovaniya dolgovechnosti konstruktсионnykh materialov. [The physical basis for the prediction of structural materials durability.] SPb.: Politehnika, 1993. S. 475.
3. Nosov V.V. Metodika akustiko-emissionnogo kontrolya prochnosti i prognozirovaniya ostatochnogo resursa metallicheskiykh konstruktсий. [Methods of acoustic emission durability testing and prediction of metal structures residual life]. *NDT World*. 2014. № 1. P. 64–66. (rus.)
4. Nosov V.V. Metodika opredeleniya informativnykh parametrov akusticheskoy emissii. [Method of acoustic emission informative parameters determining.] *Defektoskopiya*. 1998. № 5. S. 92–98. (rus.)
5. Nosov V.V., Burakov I.N. Otsenka prochnosti sosudov davleniya metodom akusticheskoy emissii. [Assessment of pressure vessels strength by acoustic emission methods]. St. Petersburg State Polytechnical. *Universiti Journal*, 2003. №3 (33). S. 210–218. (rus.)
6. Nosov V.V. Metodologiya akustiko-emissionnoy otsenki prochnosti kak osnov effektivnosti nerazrushayushchego kontrolya. [The methodology for acoustic emission strength evaluation as the Foundation of nde effectiveness.] *NDT World*. 2014. №3 (65). S. 7–13. (rus.)
7. Nosov V.V. Potapov A.I., Gomera V.P. Akusticheskiy kontrol sostoyaniya sosudov davleniya. [Acoustic monitoring of pressure vessels.] *The V conference and exhibition with international participation «Modern methods and instruments of quality control and diagnostics of a condition of objects»*. Belarus, Mogilev. September 24–25. S. 66–68. (rus.)
8. Nosov V.V., Selyutin S.V. Sovershenstvovaniye metodiki otsenki sosudov davleniya na osnove ispolzovaniya yavleniya akusticheskoy emissii. [Improved methods of pressure vessels assessment based on the use of acoustic emission.] *Week of Science in SPbSPU: materials of the theoretical and practical conference with international participation. Institute of Metallurgy, Mechanical Engineering and Transport*. St. Petersburg: SPbGPU Publ., 2014. S. 98–100. (rus.)
9. Nosov V.V. Avtomatizirovannaya otsenka resursa obraztsov konstruktсионnykh materialov na osnove mikromekhanicheskoy modeli vremennykh zavisimostey parametrov akusticheskoy emissii. [An automated assessment of the construction materials samples resource based on of temporal dependencies micromechanical models of the acoustic emission parameters.] *Defektoskopiya*. 2014. № 12. S. 24–35. (rus.)
10. Stal marki 09G2S. [Steel grade 09G2S] URL: http://www.metallischekiy-portal.ru/marki_metallov/stk/09G2S (Date of access: 23.05.2015)

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

НОСОВ Виктор Владимирович — доктор технических наук профессор кафедры машиноведения и основ конструирования Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого, профессор кафедры приборостроения Национального минерально-сырьевого университета «Горный». 195251, Россия, г. Санкт-Петербург, Политехническая ул., 29. E-mail: nosovvv@list.ru

НОМИНАС Сергей Васильевич — студент Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого. 195251, Россия, г. Санкт-Петербург, Политехническая ул., 29. E-mail: nominas.s@yandex.ru

ЗЕЛЕНСКИЙ Николай Алексеевич — аспирант кафедры приборостроения Национального минерально-сырьевого университета «Горный». 199106, Санкт-Петербург, Васильевский остров, 21 линия д.2. E-mail: smoke.kolay@mail.ru

AUTHORS

NOSOV Viktor V. — Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University and National Mineral Resources University. 29 Politechnicheskaya St., St. Petersburg, 195251, Russia. E-mail: nosovvv@list.ru

NOMINAS Sergei V. — Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University. 29 Politechnicheskaya St., St. Petersburg, 195251, Russia. E-mail: nominas.s@yandex.ru

ZELENSKY Nikolai A. — National Mineral Resources University. 2, line 21 V.O., St. Petersburg, Russia, 199106. E-mail: smoke.kolay@mail.ru