

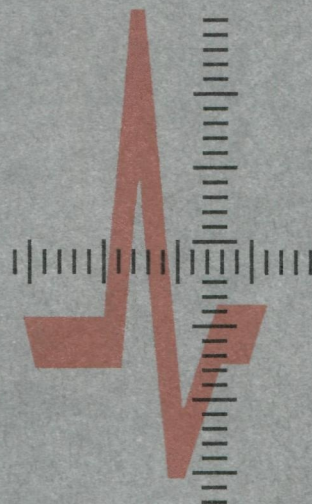
РОССИЙСКАЯ АКАДЕМИЯ НАУК

ISSN 0130—3082

Дефектоскопия

8

2015



«НАУКА»



ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТЬ МЕТОДА АКУСТИЧЕСКОЙ ЭМИССИИ ПРИ ОБНАРУЖЕНИИ ДЕФЕКТОВ В ТРУБНЫХ ИЗДЕЛИЯХ

Д.А. Борейко, И.Ю. Быков, А.Л. Смирнов

Представлен метод определения чувствительности акустико-эмиссионного контроля при обнаружении дефектов различных размеров. Согласно методу, чувствительность определяется как вероятность обнаружения сквозного отверстия определенного размера при проведении осевого сжатия цилиндрических трубных образцов из стали 09Г2С. Полученная этим методом чувствительность акустической эмиссии сравнивается с уже известными данными о чувствительности методов у.з., капиллярного и рентгенографического методов неразрушающего контроля.

Ключевые слова: неразрушающий контроль, чувствительность, акустическая эмиссия, вероятность, эффект Кайзера, нагружение, испытание, эксперимент, исследование.

В настоящее время существует множество методов неразрушающего контроля для поиска и оценки скрытых или поверхностных дефектов и на практике часто приходится делать выбор между ними. Критериями выбора конкретного метода, как правило, являются удобство применения, рекомендации действующего стандарта (либо руководящего документа) и общепризнанность метода контроля в решении поставленной практической задачи.

Для представления полной сравнительной картины возможностей различных методов контроля необходимо знать их чувствительность при выявлении дефектов, скрытых от человеческого глаза. Подобную картину в 1973 г. опубликовали американские ученые в виде графика [1] (рис. 1) [2],

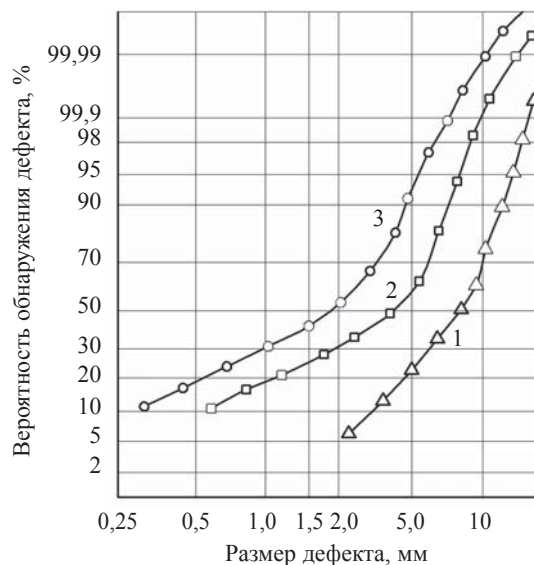


Рис. 1. Графики чувствительности методов неразрушающего контроля:
1 — рентгенографического; 2 — капиллярного; 3 — у.з.

Дмитрий Андреевич Борейко, ассистент, аспирант кафедры Машин и оборудования нефтяной и газовой промышленности Ухтинского государственного технического университета. Тел. 89041054509. E-mail: diacont_dboreyko@mail.ru

Игорь Юрьевич Быков, доктор техн. наук, профессор кафедры Машин и оборудования нефтяной и газовой промышленности Ухтинского государственного технического университета. Тел. (8216) 77-44-92, 89091206655.

Антон Леонидович Смирнов, директор ООО «ЭкспертСтрой» (г. Ухта). Тел. (8216) 76-36-77, 89505691888.

на котором показана сравнительная характеристика чувствительности у.з., капиллярного и рентгенографического методов неразрушающего контроля. Сравнение чувствительности осуществляли по вероятности обнаружения дефектов различных размеров, которую определяли по формуле

$$P = N_{\text{обн}}/N_{\text{д}}, \quad (1)$$

где $N_{\text{обн}}$ — количество обнаруженных дефектов, шт; $N_{\text{д}}$ — действительное количество дефектов, шт.

По представленным графикам можно объективно оценить эффективность указанных методов неразрушающего контроля в зависимости от размера дефекта.

Для акустической эмиссии в настоящее время известно только такое понятие, как предельная чувствительность акустико-эмиссионной аппаратуры, которая по расчетным оценкам составляет около $1 \cdot 10^{-6} \text{ мм}^2$, что для трещины протяженностью 1 мкм соответствует выявлению скачка в 1 мкм [3].

В настоящей статье рассмотрены результаты исследований по оценке чувствительности метода акустической эмиссии в процессе выявления дефектов различных размеров. Для этого нами была разработана специальная методика проведения испытаний.

Акустическая эмиссия (АЭ) — явление возникновения и распространения упругих колебаний (акустических волн) во время деформации напряженного материала. Эти акустические волны исходят от скрытых развивающихся дефектов и современная аппаратура АЭ способна регистрировать их проявление и даже определять координаты. Этот факт придает методу большую практическую ценность и широкие возможности его применения при технической диагностике.

Для определения чувствительности метода АЭ проведены испытания на осевое сжатие трубных образцов, для которых была подготовлена специальная программа, и 2 партии по 6 трубных образцов Ø100 мм с толщиной стенки 8 мм и длиной 100 мм. Образцы изготовлены из несущих ног вышки подъемного агрегата А-50М, выполненных из стали конструкционной низколегированной для сварных конструкций марки 09Г2С по ГОСТ 19281-89. В каждом из образцов каждой партии просверлено по одному отверстию 1; 1,5; 2; 3; 5 и 10 мм соответственно, которые являются симуляторами дефектов.

Для фиксации и обработки данных АЭ-контроля в процессе нагружения использовали портативную акустико-эмиссионную систему «UNISCOPE» разработки компании «ИНТЕРЮНИС» (г. Москва) с датчиками — преобразователями акустической эмиссии (ПАЭ) GT200 производства компании «ГлобалТест» (г. Саров). Внешний вид системы представлен на рис. 2а, внешний вид датчиков — на рис. 2б, общие технические характеристики оборудования — в табл. 1.

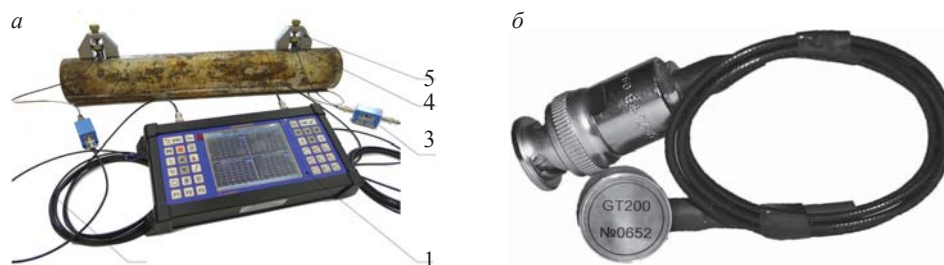


Рис. 2. Портативная АЭ-система «UNISCOPE» и датчик ПАЭ GT200:
а — АЭ-система «UNISCOPE» (1 — блок обработки и вывода данных; 2 — удлинительный кабель; 3 — предусилитель; 4 — датчик ПАЭ; 5 — магнитный держатель датчика); б — датчик ПАЭ GT200Э.

Таблица 1

Основные технические характеристики АЭ-системы «UNISCOPE»

Количество независимых аналоговых каналов регистрации	2
Диапазон рабочих частот, Гц	0,5–1 000 000
Переключаемые частотные диапазоны, кГц	0,5–30, 1–100, 30–1000
Разрядность АЦП, бит	16
Максимальная частота преобразования АЦП, МГц	20
Синхронность работы аналоговых каналов, мкс	± 1

Подготовленные к испытаниям образцы представлены на рис. 3а, схема расположения датчиков ПАЭ — на рис. 3б. Примеры линейной локационной карты и суммарного счета АЭ показаны на рис. 3в, г соответственно.

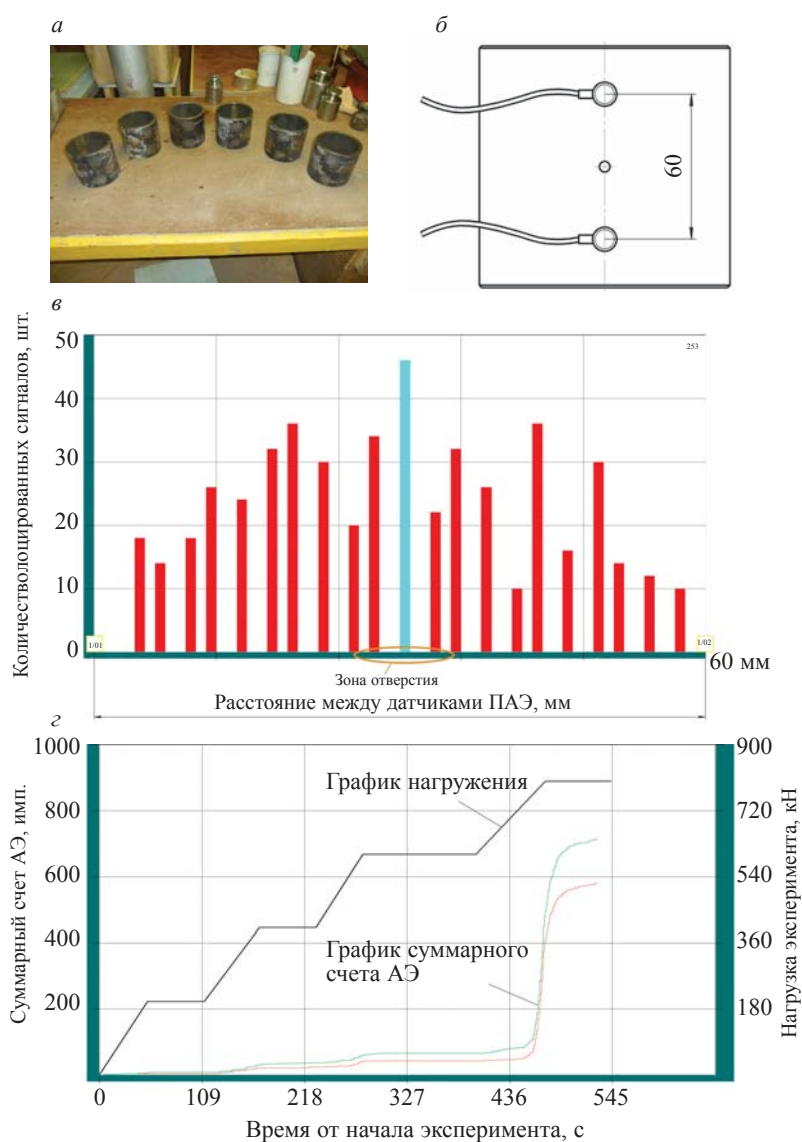


Рис. 3. Подготовленные к испытанию образцы и фиксируемые результаты:
а — подготовленные к испытанию образцы; б — схема расположения датчиков ПАЭ; в — линейная локационная карта; г — суммарный счет АЭ.

При этом на локационной карте в процессе нагружения ожидается такое количественное распределение сигналов АЭ, при котором большая их часть регистрируется в зоне отверстия с большой скоростью (см. рис. 3в), а на графике суммарного счета АЭ фиксируется резкое повышение количества импульсов в единицу времени (см. рис. 3г). Постобработку данных регистрации АЭ каждого эксперимента производили в программном продукте A-Line 32D.

На рис. 3в по оси абсцисс отложено постоянное расстояние между датчиками ПАЭ, равное 60 мм, внутри которого распределены случайно лоцированные по оси ординат сигналы, фиксирующие их количество в каждой точке лоцирования.

СУТЬ ЭКСПЕРИМЕНТА

За один цикл испытаний осевому сжатию подвергали поочередно все 6 образцов с искусственными дефектами. Нагружение осуществляли ступенчато до момента начала фиксации сигналов акустической эмиссии от заданного дефекта. Подтверждением тому, что акустический сигнал исходит именно от искусственного дефекта, служит локационная карта, при этом достаточно только линейной локации (по двум датчикам). Нагружение происходит в пределах упругой зоны для стали 09Г2С с запасом примерно 20 %. Допускаемую нагрузку при этом определяли методами компьютерного моделирования и конечно-элементного анализа.

КОНЕЧНО-ЭЛЕМЕНТНЫЙ АНАЛИЗ

Целью моделирования и конечно-элементного анализа для всех образцов является определение испытательной нагрузки эксперимента для стали 09Г2С. Эта нагрузка определяется методом итерации до значения, которое превышает запас прочности по текучести материала примерно в 1,2 раза. Цветные компьютерные твердотельные модели нагружения образцов до заданного коэффициента запаса по пределу текучести представлены на рис. 4. Это эмпирические данные, полученные в результате конечно-элементного анализа, при этом цвет характеризует распределение коэффициента запаса по объему модели образца в соответствии с цветом легенды (рис. 4б).

В результате конечно-элементного анализа определены следующие максимальные нагрузки: для образцов с отверстиями диаметром 10 мм — 756 кН; 5 — 786; 3 — 833; 2 — 1000; 1,5 — 1002; 1 — 1008.

В соответствии с полученными результатами построена зависимость изменения допустимой нагрузки от диаметра отверстия, представленная на рис. 5.

Как видно из результатов анализа, наблюдается характерное увеличение максимальной нагрузки при уменьшении диаметра отверстия, что может свидетельствовать об адекватности построенных моделей и расчета. Кроме того, красным цветом на графике выделено интересное явление, которое связано с относительным постоянством нагрузки, несмотря на последующее уменьшение диаметра отверстия. С учетом того, что модель представляет собой идеализированное состояние материала и геометрии образца, полученное явление можно объяснить тем, что образцы с отверстиями диаметром 2 мм и менее становятся менее восприимчивыми к воздействию нагрузок. Нагрузки постепенно становятся одинаковыми для различных дефектов, которые менее 2 мм, и на графике видна характерная «полочка», четко выделяющаяся на фоне других точек.

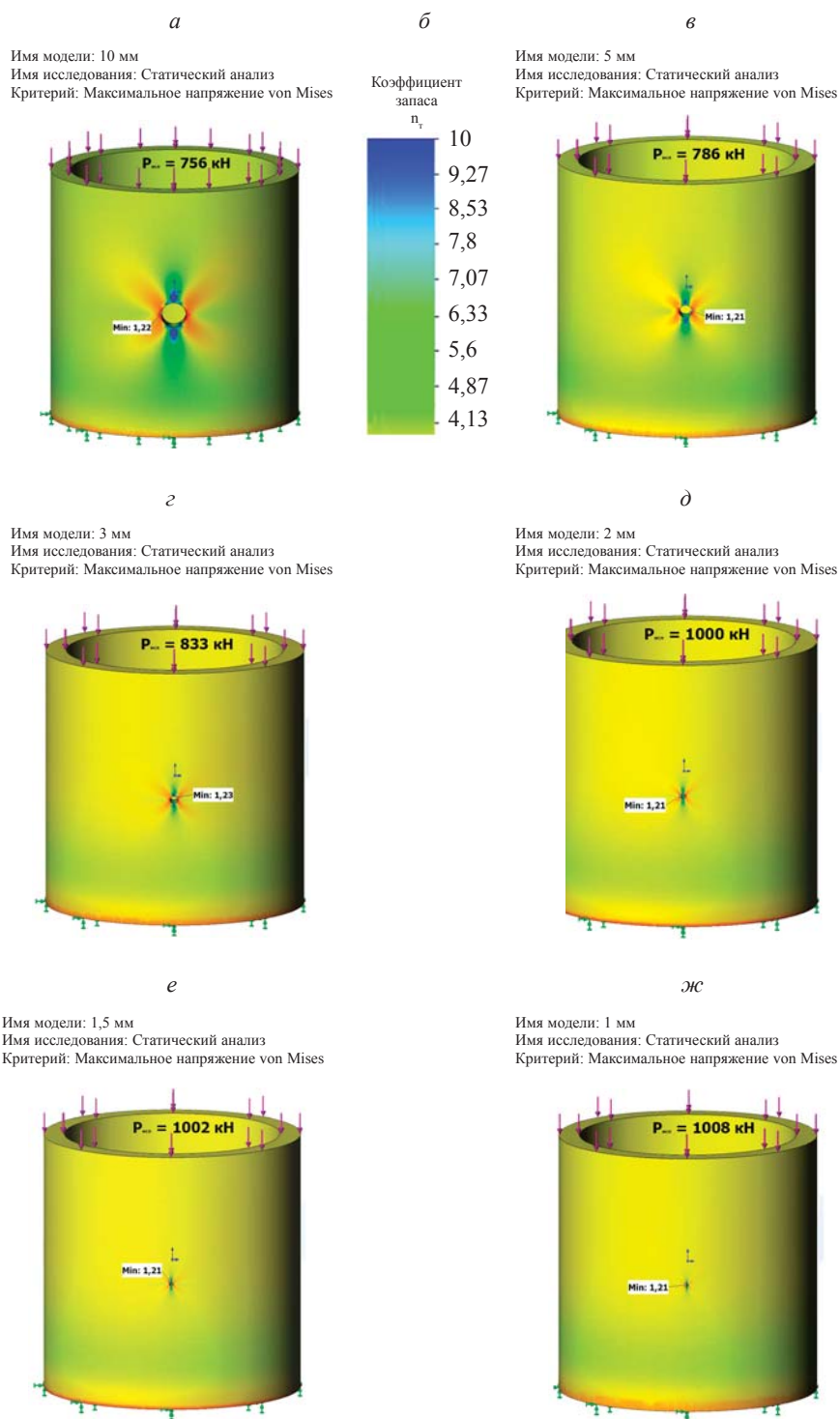


Рис. 4. Карты распределения коэффициента запаса прочности по текучести для цилиндрических образцов с отверстиями:
a, в, г, д, е, ж — твердотельные компьютерные модели образцов; *б* — легенда распределения коэффициента запаса прочности по текучести.

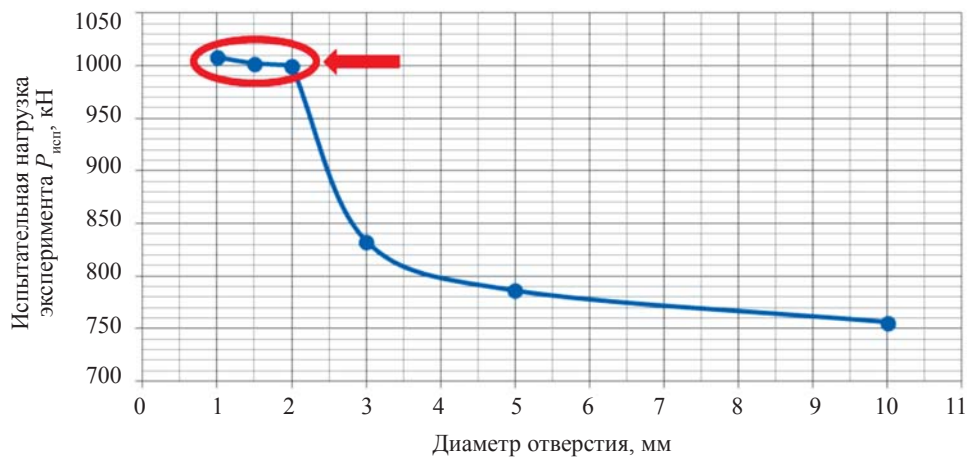


Рис. 5. Зависимость изменения допустимой нагрузки от диаметра отверстия в образце.

ПРОВЕДЕНИЕ ИСПЫТАНИЙ

Гидропрессом ступенчато повышают нагрузку на образец до максимального значения, определенного методом конечно-элементного анализа каждого образца. При этом акустико-эмиссионная система может либо зафиксировать акустический сигнал от дефекта, либо не зафиксировать его. График нагружения с допустимыми пределами, иллюстрирующий суть эксперимента, представлен на рис. 6, типовой график нагружения в соответствии с ГОСТ Р 52727-2007 [4] — на рис. 7.

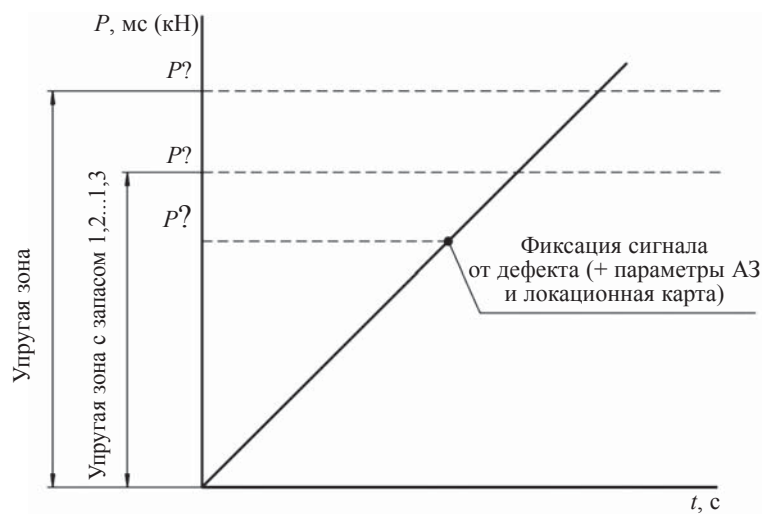


Рис. 6. График нагружения, иллюстрирующий суть эксперимента.

В настоящем эксперименте испытательной нагрузкой считается определенная на этапе моделирования испытательная нагрузка эксперимента. Остальные нагрузки определяли умножением на понижающие коэффициенты в соответствии с [4]. Полученные для каждого из образцов графики нагружения в процессе проведения эксперимента корректировали с учетом воздействия эффекта Кайзера. Повышение нагрузок осуществляли вплоть до предела текучести материала.

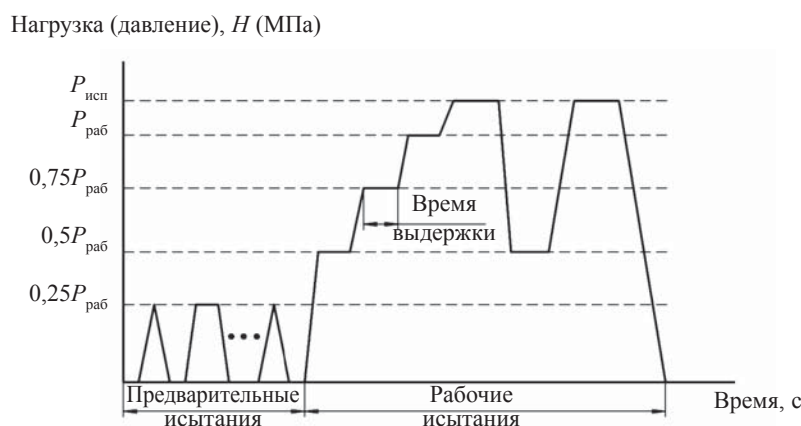


Рис. 7. Типовой график нагружения при АЭ-испытаниях.

После проведения цикла нагружения образцы оставляли для релаксации напряженного состояния в течение 24 ч. Общее количество таких нагружений: 5 для одной партии и 5 — для второй. При этом в каждом цикле нагружения для каждого образца регистрировали факт фиксации дефекта и нагрузку, при которой фиксация произошла. В дополнение к этим результатам приложены параметры акустической эмиссии, такие как локация и суммарный счет АЭ. Результаты измерений свели в таблицу.

В эксперименте использованы образцы, вырезанные из несущих ног агрегата А-50М, бывшего в эксплуатации. Так как последняя максимальная эксплуатационная нагрузка не известна, то за рабочую нагрузку условно брали нагрузку с запасом 20 % от упругой зоны, определенную конечно-элементным анализом. В тех случаях, когда в пределах упругой зоны фиксации сигнала от искусственного дефекта не произошло, следует попытка нагружения несколько большей нагрузкой, вплоть до максимального приближения к пределу текучести (полученная нагрузка далее условно считается максимальной испытательной).

РЕЗУЛЬТАТЫ ИСПЫТАНИЙ

Результаты оформлены в виде протокола в соответствии с рекомендуемой формой по ГОСТ 25.503-97 [5]. По результатам проведения опытов для каждого из образцов сформирована статистическая выборка, которую записали в сводную таблицу результатов (табл. 2), из которой видно постоянное увеличение испытательных нагрузок, что связано с воздействием эффекта Кайзера.

Вероятность обнаружения (чувствительность) метода АЭ при поиске дефектов различных размеров определили как отношение количества испытаний, в которых дефект был зафиксирован, к общему количеству испытаний для данной партии образцов

$$P = N_{\text{заф}} / N_{\text{общ}}, \quad (2)$$

где $N_{\text{заф}}$ — количества испытаний, в которых дефект был зафиксирован, шт;
 $N_{\text{общ}}$ — общее количество испытаний, шт.

Отличие формул (2) и (1) продиктовано необходимостью учитывать влияние эффекта Кайзера, который связан с отсутствием регистрации акустической эмиссии на фиксированном уровне чувствительности до тех пор, пока не превышен уровень предварительно приложенной нагрузки.

Т а б л и ц а 2

Сводная таблица результатов для всех образцов с определением вероятности обнаружения дефекта

Диаметр дефекта, мм	№ партии	№ опыта п/п	Результат (1 — фиксация; 0 — нет фиксации)	Нагрузка во время фиксации, кН
1	1	1	1	835
		2	1	925
		3	1	970
		4	0	—
		5	0	—
	Вероятность обнаружения, д. ед.: 0,6			
	2	1	1	835
		2	1	985
		3	1	1055
		4	0	—
		5	0	—
	Вероятность обнаружения, д. ед.: 0,6			
1,5	1	1	1	750
		2	1	980
		3	1	1030
		4	0	—
		5	0	—
	Вероятность обнаружения, д. ед.: 0,6			
	2	1	1	820
		2	1	975
		3	1	1003
		4	0	—
		5	0	—
	Вероятность обнаружения, д. ед.: 0,6			
2	1	1	1	800
		2	1	950
		3	1	1090
		4	1	1150
		5	0	—
	Вероятность обнаружения, д. ед.: 0,8			
	2	1	1	800
		2	1	855
		3	1	900
		4	1	1075
		5	0	—
	Вероятность обнаружения, д. ед.: 0,8			
3	1	1	1	760
		2	1	760
		3	1	850
		4	1	900
		5	0	—
	Вероятность обнаружения, д. ед.: 0,8			
	2	1	1	733
		2	1	785
		3	1	795
		4	1	810
		5	1	850
	Вероятность обнаружения, д. ед.: 0,99			

Окончание табл. 2

Диаметр дефекта, мм	№ партии	№ опыта п/п	Результат (1 — фиксация; 0 — нет фиксации)	Нагрузка во время фиксации, кН
5	1	1	1	750
		2	1	810
		3	1	820
		4	1	850
		5	1	900
	Вероятность обнаружения, д. ед.: 0,99			
	2	1	1	785
		2	1	785
		3	1	830
		4	1	850
		5	1	900
	Вероятность обнаружения, д. ед.: 0,99			
10	1	1	1	680
		2	1	710
		3	1	770
		4	1	790
		5	1	840
	Вероятность обнаружения, д. ед.: 0,99			
	2	1	1	756
		2	1	773
		3	1	786
		4	1	806
		5	1	834
	Вероятность обнаружения, д. ед.: 0,99			

Усредненные значения вероятностей, полученных по итогам испытаний, сведены в табл. 3.

Таблица 3

Результаты определения чувствительности метода АЭ

Диаметр дефекта, мм	Вероятность обнаружения (первая партия)	Вероятность обнаружения (вторая партия)	Вероятность обнаружения (средняя)
1	0,6	0,6	0,6
1,5	0,6	0,6	0,6
2	0,6	0,6	0,6
3	0,8	0,8	0,8
5	0,99	0,95	0,970
10	0,99	0,99	0,999

По полученным данным средней вероятности обнаружения дефектов построен совмещенный график для сравнения чувствительности методов неразрушающего контроля (рис. 8). Значения точек на графиках чувствительности у.з., рентгенографического и капиллярного методов здесь пересчитаны и отображены в едином масштабе с акустико-эмиссионным методом. Как видно из сравнения, чувствительность неразрушающего контроля и метода акустической эмиссии не уступает чувствительности у.з. метода, а в части обнаружения дефектов малого размера (менее 2 мм) намного превосходит его.

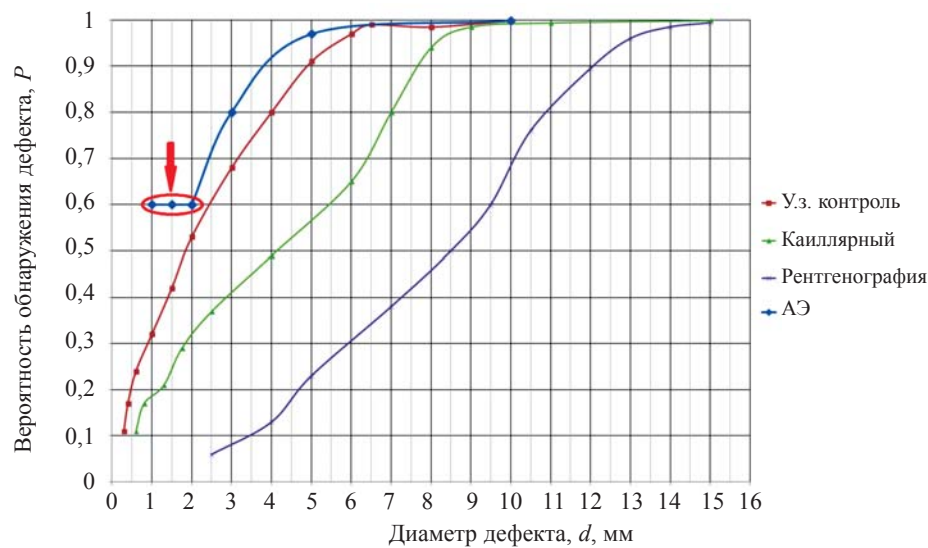


Рис. 8. Сравнительный график чувствительности традиционных методов.

ВЫВОДЫ

1. Предложена методика оценки чувствительности метода АЭ, позволившая экспериментально обосновать его высокую степень эффективности к обнаружению дефектов различного размера в трубных изделиях.
2. Полученные по результатам моделирования и конечно-элементного анализа значения нагрузок на графике в виде «ступеньки» показывают, что при диаметрах отверстий до 2 мм испытательная нагрузка эксперимента остается практически неизменной, что объясняется малой чувствительностью металла к изменениям нагрузки при наличии в структуре металла малой локальной зоны концентрации напряжений, которой в нашем случае является сквозное отверстие, симулирующее дефект.
3. Факт образования «ступеньки» подтверждается также результатами исследования чувствительности метода АЭ, которые показали, что в диапазоне размеров дефектов от 2 мм и менее вероятность их обнаружения остается постоянной на уровне 60 %.
4. Процесс проведения исследований сопровождался постоянным проявлением эффекта Кайзера, что свидетельствует о том, что дефекты находятся на той стадии своего развития, при которой еще не начался их стабильный «вязкий» рост.

Ухтинский государственный
технический университет
ООО «ЭкспертСтрой»
г. Ухта

Поступила в редакцию
17 июля 2014 г.

ЛИТЕРАТУРА

1. Hoepfner D.W., Krupp W.E. Fracture Mechanics Applications in Materials Selection Fabrication Sequencing and Inspection.— Journal of Aircraft, F01, 10, No. 11, November 1973, p. 682—688.
2. Махутов Н. А. Прочность конструкций при малоцикловом нагружении.— М.: Наука, 1983.— 272 с.
3. Неразрушающий контроль: Справочник: В 7 т. Под общ. ред. В.В. Клюева. Т. 7: В 2 кн. Кн. 1: В.И. Иванов, И.Э. Власов. Метод акустической эмиссии. Кн. 2. Ф.Я. Балицкий, А.В. Барков, Н. А. Баркова и др. Вибродиагностика.— М.: Машиностроение, 2005.— 829 с.
4. ГОСТ Р 52727-2007. Техническая диагностика. Акустико-эмиссионная диагностика. Общие требования. Введ. 2007-01-01.— М.: Стандартинформ, 2007.— 12 с.
5. ГОСТ 25.503-97. Расчеты и испытания на прочность. Методы механических испытаний металлов. Метод испытания на сжатие. Введ. 1999-07-01.— Минск: ИПК Изд-во стандартов, 1999.— 27 с.