

На правах рукописи

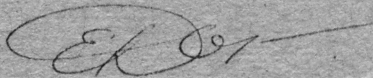
УДК 621.791.052.08:620.179.16

ДОРОХОВА Елена Германовна

РАЗРАБОТКА МЕТОДИКИ ИДЕНТИФИКАЦИИ ИСТОЧНИКОВ
АКУСТИЧЕСКОЙ ЭМИССИИ ПРИ КОНТРОЛЕ СВАРНЫХ
ТРУБОПРОВОДОВ НА ОСНОВЕ КОМПЛЕКСНЫХ ИНФОРМАТИВНЫХ
ПАРАМЕТРОВ

Специальность 05.02.11.- Методы контроля и диагностика
в машиностроении

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук



Москва - 2000

Работа выполнена в Московском государственном техническом университете имени Н.Э.Баумана

Научные руководители: кандидат технических наук, доцент ШИП В.В.,
кандидат технических наук БИГУС Г.А.

Официальные оппоненты: доктор технических наук БАРАНОВ В.М.
кандидат технических наук СТРИЖКОВ С.А.

Ведущее предприятие: ПО «Спецнефтегаз»

Защита состоится 29 июля 2000 г. на заседании диссертационного совета Д 053.15.07 при МГТУ им. Н.Э.Баумана по адресу:
107005, Москва, 2-я Бауманская ул., д.5.

Ваш отзыв на автореферат в 1 экз., заверенный печатью, просим выслать по указанному адресу.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке МГТУ им. Н.Э.Баумана.

НТБ МГТУ им. Н.Э.Баумана



1566804

Дорохова Е.Г. Разработка

Шип В.В.

Коновалов А.В.

1566804

0 п.л. Тираж 100 экз.
фия МГТУ им.Н.Э.Баумана

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. Современное состояние ответственных металлоконструкций, в особенности со сроками эксплуатации, близкими к расчетным, требует проведения регулярных диагностических мероприятий с использованием методов неразрушающего контроля (НК). В настоящее время, около 80 % объема диагностических работ приходится на долю акустических методов НК, среди которых особое место занимает метод акустической эмиссии (АЭ), с помощью которого выявляют дефекты в материале по излучению ими упругих волн при каком-либо нагружении. Это делает его весьма эффективным инструментом при продолжительном мониторинге и испытаниях труднодоступных и крупногабаритных объектов.

Несмотря на перспективность метода АЭ, его широкое и надежное использование сдерживается трудностью и неоднозначностью интерпретации результатов АЭ измерений, сложностью и высокой стоимостью АЭ аппаратуры. В связи с этим данная работа, направленная на создание методики идентификации источников АЭ на основе информативных комплексных параметров АЭ с широким использованием статистического анализа, программных средств и вычислительной техники, представляется актуальной. Необходимость данной работы связана также с тем, что в ней, во-первых, получает дальнейшее развитие методика использования комплексных параметров АЭ, преимущество которых доказано предшествующими авторами; во-вторых, упрощение процедуры идентификации источника АЭ и, затем, дефекта сварного соединения достигается за счет переноса процесса обработки информации из аппаратурной части АЭ системы в область программного обеспечения, что обеспечивает гибкость, мобильность и сочетаемость с различными АЭ приборами, поскольку исходными данными разрабатываемой методики являются простые традиционные параметры АЭ (амплитуда, счет, скорость счета) и координаты источника.

Цель работы. Повышение достоверности АЭ контроля сварных трубопроводов за счет более полной информативной обработки данных, полученных при АЭ измерениях, а также упрощение процедуры принятия решения.

Для достижения поставленной цели было необходимо решить следующие основные задачи:

1. Оценить существующие диагностические критерии развития поврежденности основного металла и металла сварных соединений труб с точки зрения метода акустической эмиссии и особенностей объекта.
2. Построить модель соответствия акустического образа источников АЭ реальным дефектам в металле сварного соединения.
3. Построить эффективную систему критериев, способную характеризовать различные стадии развития дефекта в металле.

4. Разработать алгоритм и программные средства для идентификации дефектов, не требующие применения сложной акустико-эмиссионной аппаратуры, на основе статистической обработки данных АЭ измерений.

5. Разработать методические рекомендации по выбору параметров и технике АЭ измерений в процессе испытаний или эксплуатации объектов.

Методы исследования. При разработке пространственно-временной классификации элементарных источников АЭ использовались принципы теории поля.

Анализ акустического тракта проводился на основании положений акустики и теории радиотехнических цепей и сигналов.

Обработка экспериментальных данных проводилась методами теории вероятностей и математической статистики.

В экспериментах, за исключением проведенных предыдущими авторами, использовалась следующая аппаратура и образцы: акустико-эмиссионная система НЗЭ-011 (НПО «Волна», Кишинев, Молдавия), акустико-эмиссионный прибор PAC-4610 (фирма PAC, США), акустико-эмиссионная система LOCAN 320 (фирма PAC, США).

Научная новизна работы.

Предложен информативный параметр, до сих пор не применявшийся для характеристики АЭ - энтропия спектрального распределения амплитуды сигналов АЭ, как частный случай энтропии распределения вероятности параметров АЭ.

Предложено характеризовать АЭ процесс, сопровождающий динамическую перестройку структуры материала комплексным параметрами с координатами: (A_{cp} - средняя амплитуда, H_d - энтропия распределения амплитуд, Δt_{cp} - средний интервал между импульсами АЭ) или ($E_{полн}$ - полная энергия спектра, H_E энтропия спектрального распределения, F_d - доминантная частота спектра), позволяющими в реальном масштабе времени обнаружить смену механизма развития поврежденности металла.

Установлено, что при развитии усталостной трещины изменение энтропии амплитудного распределения начинается на стадии «разрыхления» металла, в то время как традиционные параметры АЭ (амплитуда, энергия, скорость счета) начинают меняться только на стадии стабильного роста трещины, что позволяет обнаружить усталостные повреждения на ранних стадиях развития.

Получена зависимость энтропии амплитудного распределения от средней амплитуды сигнала акустической эмиссии для бездефектного образца, позволяющая проводить сравнительную оценку степени опасности дефекта.

Практическая ценность работы заключается в том, что:

• разработан способ описания процессов развития повреждений в трубопроводах с помощью численных параметров, характеризующих изменение формы распределения параметров сигналов АЭ.

- разработанные алгоритмы и программный комплекс ENTRAE использованы при разработке как новой АЭ аппаратуры в качестве основы для аппаратных схем, так и программного обеспечения;

- даны рекомендации по выбору измеряемых и комплексных параметров АЭ и технике измерений;

- результаты работы использованы при разработке методики акустико-эмиссионного мониторинга Главного Монумента памятника Победы на Поклонной Горе;

- разработанная методика позволяет проводить диагностику сложных объектов (сварных магистральных трубопроводов и резервуаров), используя сравнительно простые АЭ приборы и простой набор параметров АЭ, а также позволяет проводить идентификацию источника по немногочисленным данным за счет перехода к анализу нормально распределенных интегральных параметров выборок.

Апробация работы и публикации. Основные результаты работы доложены и обсуждены на 6-ти Международных конференциях. Содержание диссертации изложено в 8 публикациях и отражено в ряде научно-технических отчетов и статей.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, четырех глав, общих выводов по работе и приложения. Выполнена на 111 машинописном листе, содержит 15 рисунков, 8 таблиц и 77 наименований использованных источников.

КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении рассмотрены состояние вопроса, актуальность выбранной темы и необходимость создания методики.

Первая глава посвящена постановке задачи исследования. В ней дана краткая характеристика объекта исследований и проведен анализ дефектности материала труб, а также на основании литературных данных сделана оценка существующих диагностических критериев, которые применяются при АЭ контроле трубопроводного транспорта.

Объектом исследования данной работы являлись сварные соединения участков газопроводов и нефтепроводов с рабочим давлением до 10 МПа.

Анализ работоспособности газопроводов показывает, что причинами отказов, обусловленных дефектами сварных соединений, служили непровары - (62-63)%, недопустимые по величине смещения кромок - 25%, подрезы в подварочном шве - (12-13)%. Таким образом, большинство отказов (74-76)% в магистральных газопроводах обусловлено наличием трещиноподобных дефектов. Одиночные поры и шлаковые включения при отсутствии непроваров и трещин как правило не вызывают разрушений.

Главными причинами лавинных разрушений магистральных трубопро-

водов, локальных разрушений труб в установках комплексной подготовки газа являются хрупкие разрушения металла, инициаторами которых являются трещины. Наиболее вероятные места образования опасных трещин - сварные швы, фланцевые соединения, места сгибов, переходов и т.п. Трещины образуются из дефектов, имеющихся в сварных соединениях или в самом материале трубопровода. Их развитию под нагрузкой до критических размеров, при которых начинается лавинное разрушение, предшествуют определенные стадии состояния предразрушения.

Среди различных методов неразрушающего контроля особой чувствительностью к процессам, происходящим в материале, обладает метод акустической эмиссии (АЭ). Основная особенность этого метода - выявление дефекта в материале по излучению им упругих волн при каком-либо нагружении - делает его весьма эффективным инструментом при продолжительном мониторинге и испытаниях труднодоступных и крупногабаритных объектов.

При использовании для диагностики метода УЗК возможно определить и проанализировать импульсную характеристику акустического тракта спектральным методом, поскольку известен как сигнал на входе, так и сигнал на выходе тракта. При акустико-эмиссионном контроле использование спектрального метода в том или ином виде не корректно из-за пространственно - временной неопределенности сигнала, источника.

Особенностями, выделяющими сигнал акустической эмиссии из совокупности ультразвуковых сигналов, способных распространяться в упругих телах являются:

- а) Импульсный характер.
- б) Статистическая случайность во времени и пространстве.
- в) Спектр и частотный диапазон.
- г) Амплитудная модуляция сигнала АЭ внешними полями.

Указанные особенности АЭ сигнала позволяют сформулировать принципы АЭ контроля структурно-неоднородных материалов:

1. Измерение параметров и комплексов параметров АЭ наименее чувствительных к проявлению неоднородностей.
2. Ранжирование источников по энергии.
3. Предварительная идентификация.
4. Окончательная идентификация.
5. Разработка и использование алгоритмов обработки потока АЭ параметров, максимально компенсирующих негативное влияние неоднородностей акустического тракта.
6. Построение моделей акустико-эмиссионного процесса и проведение имитационных экспериментов на образцах, участках трубопроводов с целью разработки методик учета влияния нелинейного и неоднородного акустического тракта исследуемого объекта.

Проанализированные критерии вне зависимости от содержащегося в них физического смысла имеют следующие общие для всех особенности.

1. Классифицируют не дефект, а источник акустической эмиссии;
2. Источник классифицируется только по степени опасности;
3. Каждый критерий содержит в себе не вполне определенные параметры, использование которых существенно усиливает действие субъективного фактора, так как их выбор или предварительное экспериментальное определение в значительной мере зависят от произвола оператора, проводящего контроль.

Вследствие этого, определение типа дефекта при помощи используемых критериев практически невозможно.

Во второй главе проведен анализ акустического тракта АЭ системы, состоящего из источника АЭ и среды распространения упругих волн.

Существующие источники АЭ формально разделены на следующие группы:

- по величине интервала между импульсами: дискретные, условно непрерывные и непрерывные;
- по объему, занимаемому в материале: точечные, сосредоточенные и распределенные;
- по положению в пространстве и форме: на линейные различной ориентации, плоскостные и объемные;
- по скорости движения: неподвижные и движущиеся;
- по интенсивности: имеющие большую, среднюю и малую интенсивность.

Подавляющее большинство АЭ систем в настоящее время рассчитано на измерение традиционных скалярных параметров акустической эмиссии: амплитуды, энергии, скорости счета и активности, числа осцилляций, а также интервала между импульсами, времени нарастания фронта импульса и некоторых других. При этом дефект сварного шва или металла трубы рассматривается как совокупность элементарных источников АЭ, расположенных в относительно небольшой области пространства и действующих независимо.

Дана пространственно-временная классификация элементарных источников АЭ и приведены их функции.

Функция источника является математической моделью излучателя. В этом случае решением волнового уравнения в общем виде является следующий интеграл:

$$u(\mathbf{r}', t') = \int f(\mathbf{r}, t) G(\mathbf{r}, \mathbf{r}', t, t') d\mathbf{r} dt, \quad (1)$$

где $u(\mathbf{r}', t')$ - поле перемещений в точке $\mathbf{r}'$ в момент времени t' ;

$f(\mathbf{r}, t)$ - функция источника;

$G(\mathbf{r}, \mathbf{r}', t, t')$ - функция Грина, являющаяся математической моделью объекта.

Построены модели следующих источников на основе принципа супер-

позиции с учетом результатов исследований физики процессов разрушения: 1. Элементарный источник АЭ (зародыш дефекта) - мгновенный точечный источник. 2. Упругая (микропластическая) деформация в материале. 3. Пластическая деформация в некотором объеме. 4. Пластическая деформация в вершине трещины. 5. Открывающаяся микротрещина. 6. Вершина стабильной подрастающей трещины в случае хрупкого разрушения и в случае вязкопластичного разрушения. 7. Вершина трещины в момент срагивания. 8. Вершина нестабильной растущей трещины - мощный движущийся точечный импульсный источник. 9. Лавинообразное разрушение материала.

Данные АЭ измерений представляют собой зафиксированную тем или иным способом упорядоченную во времени последовательность значений измеряемых параметров. Несмотря на то, что такая последовательность содержит в себе информацию о протекающих в объекте процессах, ее сложно интерпретировать без какой-либо предварительной обработки. В то же время использование какого-либо одного параметра приводит к потере информации, содержащейся в других, что неизбежно сказывается на результате испытаний и качестве принимаемых решений.

Использование несложных программных средств позволяет на основе различных комбинаций формировать из скалярных параметров АЭ параметры векторные, в том числе и многомерные. Если унифицировать схему дальнейшей обработки полученных комплексных параметров, появляется возможность выбрать оптимальное с точки зрения разрешающей способности пространство признаков.

В большинстве практических случаев (в процессе испытаний и при эксплуатационном контроле объектов) спектральный анализ трудноосуществим, в частности из-за недостатка соответствующего оборудования и аппаратуры. Поэтому предлагается использовать для идентификации стадии предразрушения более традиционные параметры АЭ процесса, такие как распределения сигналов по амплитуде или энергии, счет импульсов АЭ и скорость счета, формируя из них комплексные параметры. В результате статистической обработки комплексных параметров получают акустические образы стадий предразрушения и развития трещины, дающие возможность контролировать объект в реальном масштабе времени.

Рассмотрены факторы, влияющие на распространение АЭ сигнала в металле трубы, такие как геометрия объекта и акустическая неоднородность материала. Установлено, что минимальным набором параметров, наименее чувствительных к влиянию акустического тракта, обеспечивающим идентификацию источника АЭ, является пара параметров, один из которых принадлежит к «энергетической» группе (A , E), а другой – к «частотно-временной» группе (F , Δt). Для идентификации же дефекта, кроме этого, требуется учет изменения этих параметров во времени. Поскольку известно, что достоверность идентификации объекта увеличивается при увеличении числа характеристик,

предложено использовать в качестве компонента комплексного параметра численную характеристику формы распределения вероятности параметров АЭ – энтропию распределения вероятности.

При вычислении энтропии по формуле:

$$H = - \sum_{i=1}^N p_i \ln(p_i), \quad (2)$$

где p_i – вероятность появления значения параметра АЭ в выборке и N – число интервалов разбиения динамического диапазона АЭ приборов, косвенным образом учитываются следующие традиционные параметры: счет АЭ, скорость счета, число событий АЭ. В основании логарифма, находящегося под знаком суммы равноправно могут находиться числа 2, e и 10, выбираемые произвольно. В данном случае выбрано число e , которое естественным образом присутствует в описании физических процессов, каким является акустическая эмиссия, при этом энтропия измеряется в натуральных единицах (нит).

Этот статистический параметр связан с формой распределения. Отнесенный к максимальной энтропии (энтропии равномерного распределения с тем же числом интервалов), равной $\ln(N)$, он характеризует степень отклонения данного распределения от равномерного:

$$H_{\text{отн}} = H / \ln(N) \quad (3)$$

Принимая во внимание то, что амплитуда акустической эмиссии бездефектного объекта имеет распределение, близкое к экспоненциальному, было выведено аналитическое выражение для зависимости относительной энтропии от амплитуды АЭ бездефектного объекта:

$$H_{\text{отн}}(A_{\text{ср}}) = (1 + \ln(A_{\text{ср}})) / \ln(N) \quad (4)$$

Возможность использования энтропии распределения вероятности параметров АЭ рассматривается в работе на примере энтропии распределения амплитуд и энтропии распределения энергии импульса АЭ по частоте, вычисляемой с использованием нормирования спектральных составляющих относительно максимальной энергии в спектре. В этом случае случайным событием считается приход к преобразователю АЭ упругой волны с некоторой долей энергии в определенной полосе частот. Доля энергии в i -той полосе частот по отношению к полной энергии сигнала определяется по следующей формуле:

$$p_i = E_i^{\text{sum}} / E^{\text{sum}}, \quad (5)$$

где $i=1, 2, \dots, N$, а N – число интервалов разбиения спектра.

В выражении (3) E_i^{sum} – энергия в i -том интервале частот, а E^{sum} – полная энергия спектра, которые могут быть получены следующим образом:

$$E_1^{\text{sum}} = \int_{f_{i-1}}^{f_i} E(f) df, \quad (6)$$

где

$$E(f) = 1/2\pi \int_{-\infty}^{\infty} u(t) \exp(i2\pi ft) dt, \quad (7)$$

а $u(t)$ - форма импульса (сигнала) АЭ.

В третьей главе рассматривается возможность распознавания источников АЭ и дефектов сварных соединений по результатам обработки данных экспериментальных исследований.

Для анализа АЭ информации, ключевым моментом обработки данных является переход от обработки произвольно распределенных первичных параметров АЭ к обработке их статистических характеристик, имеющих гауссово распределение.

При испытаниях крупногабаритного образца исследовался такой источник АЭ, как пластическая деформация различной степени локальности: в вершине надреза, в сварном шве и общая текучесть основного металла, т.е. физически однородный процесс. В этом случае, наибольшее значение имеет изменение пространственных характеристик источника АЭ, которое влечет за собой изменение вероятностной структуры потока сигналов АЭ, а также его спектральной структуры. На рисунке 1 показано изменение параметров АЭ, измеренных в одинаковых условиях, в зависимости от стадии деформирования: спектры №№ 1 – 10 относятся к пластической деформации в вершине надреза, спектры №№ 11 – 19 относятся к пластической деформации в сварном шве и спектры №№ 20 – 37 относятся к общей текучести металла. Таким образом, критерием перехода от одной стадии деформирования к другой является существенное изменение статистических характеристик спектра сигнала АЭ при постоянстве общего характера распределений. Другими словами, момент перехода от одной стадии деформирования к другой может быть определен моментом нарушения стационарности потока АЭ данных (скачкообразное изменение его параметров, например математического ожидания).

На основании наблюдений изменения формы спектра сигнала АЭ при развитии процесса пластической деформации, предложен информативный параметр, до сих пор не применявшийся для характеристики АЭ - энтропия спектрального распределения сигналов АЭ, как частный случай энтропии распределения вероятности параметров АЭ.

Полученные при испытаниях данные обрабатывались в соответствии с разработанной методикой, в результате чего были построены эллипсы рассеяния в следующих координатах: "доминантная частота - полная энергия

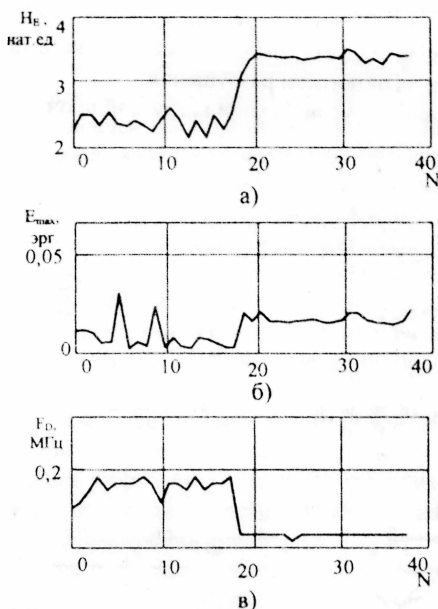


Рис. 1. Энтропия спектрального распределения энергии H_E (а), полная энергия спектра E_{sum} (б) и доминантная частота спектра F_D (в) в зависимости от номера спектра N .

спектра" и "энтропия спектрального распределения - полная энергия спектра" в условиях известной дисперсии, а также в условиях неизвестной дисперсии генеральной последовательности, показанные на рис. 2.

В процессе эксплуатации металл трубопровода многократно подвергается как санкционированным, так и несанкционированным подъемам и спускам давления, воздействию ветра и перепадов температур, в результате чего в нем могут развиваться очаги усталостного разрушения. В целях моделирования этих процессов, а также для отработки методики идентификации стадий разрушения по форме амплитудного распределения сигналов АЭ был проведен следующий эксперимент.

Применялись образцы в количестве 10 штук из алюминия АМг6 ($\sigma_s=295$ МПа) в виде пластин размером 350x45x2 мм с краевым надрезом длиной 12,5 мм и шириной 0,7 мм, расположенным на оси симметрии и предназначенным для инициирования разрушения. В качестве материала образцов был выбран алюминий, поскольку его прочность и, соответственно, время разрушения

существенно меньше аналогичных характеристик трубных сталей. На каждый образец, перпендикулярно надрезу, была нанесена сетка с шагом 1 мм для визуального наблюдения за развитием разрушения.

Нагружение циклической синусоидальной нагрузкой производилось при

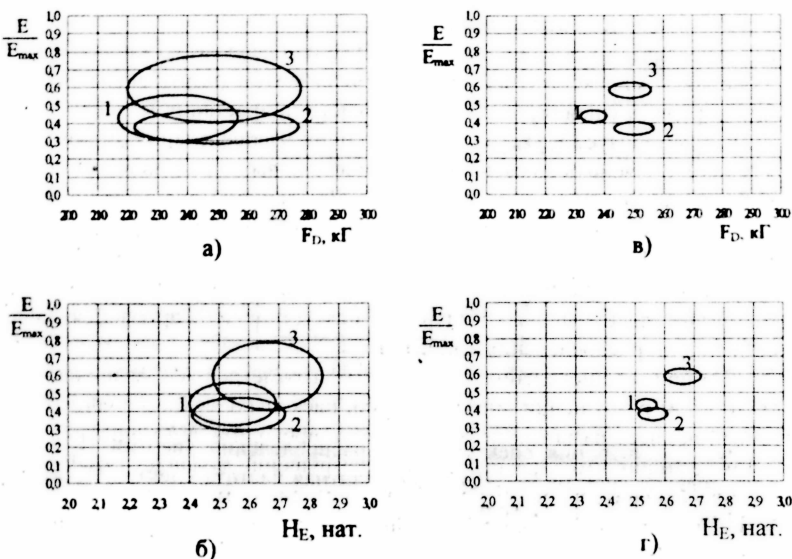


Рис.2. Эллипсы рассеяния для комплексных параметров “доминантная частота - полная энергия спектра” (а) и “энтропия спектрального распределения - полная энергия спектра” (б) в условиях известной дисперсии. “доминантная частота - полная энергия спектра” (в) и “энтропия спектрального распределения - полная энергия спектра” (г) в условиях неизвестной дисперсии. 1-пластическая деформация в вершине надреза; 2-пластическая деформация в сварном шве; 3-общая текучесть металла.

помощи машины EUS-100 с параметрами $P_{\max} = 500$ кгс, коэффициент асимметрии $\rho = 0.3$ и частотой 12 Гц.

При измерениях фиксировался полный поток АЭ информации по параметрам амплитуда и скорость счета при помощи АЭ прибора НЗЭ-011 (г.Кишинев) широкополосными преобразователями АЭ (МГТУ им. Н.Э.Баумана). В ходе эксперимента также фиксировалось число циклов нагружения и длина трещины при подрастании трещины на каждый миллиметр,

вплоть до начала лавинообразного разрушения. Таким образом, устанавливалось однозначное временное соответствие между механическими, акустическими данными и стадиями разрушения образца.

Полученная последовательность значений параметров акустической эмиссии, возникающей при образовании и подрастании усталостной трещины в вершине надреза, анализировалась при помощи программного комплекса ENTRAE. Доверительные интервалы комплексных параметров, соответствующие трещине, подросшей на определенную длину, изображены на рис.3. Эта последовательность эллипсов рассеивания позволяет установить характер изменения комплексных параметров при развитии разрушения. Переход от стадии предразрушения к стадии стабильного подрастания трещины (эллипсы 1 и 2) характеризуется увеличением энтропии распределения амплитуд, которое можно объяснить вовлечением в процесс новых объемов вещества, расположенного вблизи вершины трещины. Дальнейший рост трещины (эллипс 3) приводит к тому, что процесс акустической эмиссии перестает быть стационарным. При достижении трещиной длины $l = 4$ см началось неконтролируемое ускорение разрушения (эллипс 4), что привело к усреднению и снижению амплитуды суммарных импульсов, вследствие чего произошло уменьшение энтропии распределения амплитуд.

На примере поведения комплексных параметров АЭ, возникающей при усталостном разрушении образца, видно, насколько важно наблюдать непрерывный процесс развития дефекта, то есть проводить АЭ мониторинг объекта. Также видно, что о начале процесса разрушения можно судить уже по увеличению относительной энтропии распределения амплитуд, в то время как, увеличение средней амплитуды начинается только на нестационарной фазе развития дефекта.

Для проверки эффективности разработанной методики была предпринята обработка данных АЭ измерений, полученных при разрушающих гидротests испытаниях натурального образца. Натурный образец представляли собой плетель, вырезанную из эксплуатирующегося газопровода Оренбург - Заинск диаметром 1020 мм и толщиной $d=16-18$ мм из трубной стали производства Франции, аналога 17Г1СУ.

В плетель длиной ~ 30 м были врезаны катушки длиной несколько метров с различными искусственными и естественными дефектами. Естественные дефекты были обнаружены после прохождения внутри трубы снаряда дефектоскопа. Одновременно с разрушающими гидротests испытаниями проводились акустико-эмиссионные испытания с целью локализации источников АЭ, а также установления характера АЭ, кинетики АЭ процесса, идентификации источников АЭ и принадлежности их к тем или иным дефектам. При испытаниях использовалась АЭ система НЗЭ-011 (Кишинев) совместно с NOTEBOOK PC, которая предназначена для приема и обработки сигналов АЭ, регистрации

параметров АЭ и определения координат источников АЭ в линейных и плоских объектах по измеряемому значению разности времен прихода к ПАЭ. Основными параметрами, регистрировавшимися в ходе эксперимента, являлись число импульсов, суммарный счет, скорость счета, активность, время нарастания, длительность импульса, пиковое значение импульса АЭ.

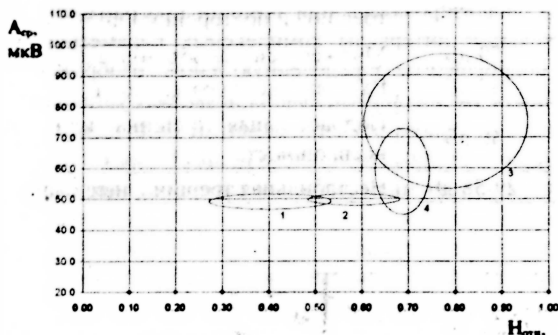


Рис.3. Эллипсы рассеяния для растущей трещины различной длины l при испытаниях на малоцикловую усталость. 1 – «разрушение» металла; 2 – трещина $l = 1$ мм; 3 – трещина $l = 2$ мм; 4 – трещина $l = 3+4$ мм

Диапазон рабочих частот системы $10 \text{ кГц} + 1000 \text{ кГц}$, максимальная чувствительность к механическим смещениям в диапазоне частот $0,2+0,5 \text{ МГц}$ не более 10^{14} м . Динамический диапазон системы составляет 50 дБ. Одновременно, для слежения в реальном времени за АЭ процессом, с целью предупредить момент разрушения и снятия датчиков с образца использовалась одноканальный АЭ прибор фирмы PAC-4610 (США).

В процессе испытаний локации источников АЭ были выявлены несколько зон повышенной акустико-эмиссионной активности, характеризующиеся различным уровнем амплитуд и объемом занимаемого пространства. Результаты эксперимента и последующей обработки данных показали, что зоны скопления дефектов в образцах №1 и №2 и зоны акустической эмиссии, обнаруженные экспериментально, совпадают. Также совпадает характер реальных дефектов и определенный при обработке АЭ информации с помощью таких параметров потока АЭ импульсов, как средняя амплитуда и энтропия распределения вероятности амплитуд. Наиболее ярко это совпадение проявилось при обнаружении причин разрушения образцов: непровара, неопределенного ранее - в первом случае, и обширных зон коррозионных повреждений - во втором.

Соответствие между относительной энтропией амплитудных распределений и средней амплитудой представлено в таблице 1, а на рисунке 4 показаны эллипсы рассеивания, нанесенные на диагностическую диаграмму.

Таблица 1.

Относительная энтропия	Средняя амплитуда	Характер повреждения
0.98	40 дБ	Зоны коррозионного растрескивания.
0.83	33 дБ	Пластическая деформация, стабильная трещина и посторонний шум.
0.75	50 дБ	Множественные объемные дефекты.
0.56	60 дБ	Развивающееся расслоение.
0.41	40 дБ	Подрастающая трещина или другая несплошность.
0.15	29-58 дБ	Нестабильная трещина, непровар.

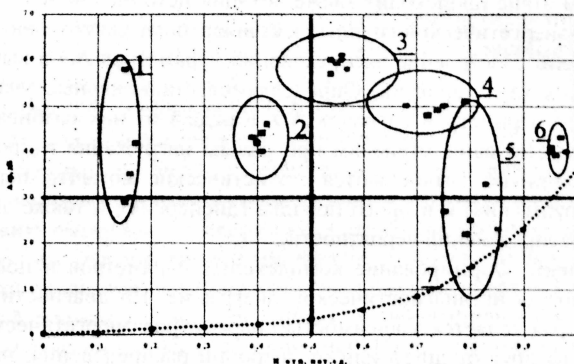


Рис.4. Результаты АЭ испытаний крупногабаритных образцов №1 и №2 на диагностической диаграмме. 1 - нестабильная трещина, непровар; 2 - подрастающая трещина; 3 - развивающееся расслоение; 4 - множественные объемные дефекты; 5 - пластическая деформация, стабильная трещина; 6 - коррозионное растрескивание; 7 - уровень бездефектности;

В четвертой главе приводятся описания многоуровневой методики идентификации источника акустической эмиссии, алгоритм обработки акустико-эмиссионной информации, а также описание программного комплекса ENTRAE, позволяющего вычислять комплексные параметры и создавать статистический образ АЭ процесса. Даны рекомендации по определению объема выборки данных при измерении значений АЭ параметров.

Идентификация источников акустической эмиссии в трубопроводе осуществляется в процессе обработки разнообразных данных, полученных в процессе испытаний и эксплуатации объекта, и основывается на выборе измеряемых и информативных параметров, расчете и построении системы статистических образов источников АЭ и дефектов объекта. Разработанная методика, применяемая для этого, содержит ряд уровней обработки информации и заключается в следующем:

0 уровень: Визуальный осмотр. Получение априорной информации о вероятных дефектах. На этом уровне определяются характеристики объекта, и производится настройка акустико-эмиссионной аппаратуры, разрабатываются схемы контроля и программа нагружения объекта.

1 уровень: Проведение акустико-эмиссионных измерений. Получение последовательности традиционных параметров АЭ (A , N_c , N_c/t , координаты, и т.д.). На этом этапе происходит также локация источников АЭ и приведение параметров «энергетической группы» к стандартному расстоянию.

2 уровень: Построение распределений параметров АЭ и вычисление их статистических характеристик. Определяются стационарные участки последовательности параметров сигналов АЭ. Каждый из них разбивается на выборки, соответствующие ступеням программы нагружения и координате вероятных источников. Вычисляются статистические моменты первого (математическое ожидание) и второго порядка (дисперсия), а также энтропия для каждого из распределений вероятности.

3 уровень: Формирование комплексных параметров и построение эллипсов рассеяния на диагностической диаграмме. На диагностическую диаграмму, которая является зависимостью параметров энергетической или частотной группы друг от друга или от энтропии распределения, наносятся эллипсы рассеяния, нумеруемые в порядке вычисления.

4 уровень: Определение типа источника АЭ и дефекта. Тип источника определяется как по положению эллипса рассеяния на диагностической диаграмме, так и относительно других эллипсов. Тип дефекта определяется совокупностью эллипсов рассеяния, относящихся к одной и той же координате (дефектной области на объекте).

5 уровень: Принятие решения. По результатам идентификации принимается решение о степени опасности дефекта и мерах по его устранению.

Данная методика реализуется при помощи разработанного программного комплекса ENTRAE, который позволяет вычислять статистические характеристики потока АЭ информации, комплексные параметры и строить диагностическую диаграмму.

Приведена примерная инструкция оператора, использующего разработанную методику при акустико-эмиссионном мониторинге объекта, а также даны рекомендации по определению оптимального объема выборки данных АЭ измерений.

ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ И РЕЗУЛЬТАТЫ

1. Установлено, что большинство аварий сварных трубопроводов, эксплуатирующихся более 20 лет обусловлено наличием трещиноподобных дефектов в сварных соединениях и околошовных зонах, утечки вызваны развитием сквозных коррозионных дефектов.
2. Установлено, что реальный сигнал акустической эмиссии претерпевает трансформации при распространении за счет затухания, дисперсии, рассеяния и переотражений на случайных неоднородностях структуры металла и неровных границах трубы, а также в результате взаимодействия с транспортируемым продуктом в связи с чем детерминированное описание его не представляется возможным.
3. Предложено рассматривать акустический образ дефекта как совокупность элементарных источников акустической эмиссии, действующих одновременно или последовательно, но независимо друг от друга.
4. Предложено характеризовать АЭ процесс, сопровождающий динамическую перестройку структуры материала наименее чувствительными к преобразованию сигнала в акустическом тракте комплексными параметрами с координатами: (A_{cp} - средняя амплитуда, H_A - энтропия распределения амплитуд, Δt_{cp} - средний интервал между импульсами АЭ) или (E_{total} - полная энергия спектра, H_E энтропия спектрального распределения, F_d - доминантная частота спектра), позволяющими в реальном масштабе времени обнаружить смену механизма развития поврежденности металла.
5. Показано, что доверительные интервалы (эллипсы рассеяния) для комплексного параметра, построенные в условиях неизвестной дисперсии генеральной последовательности данных, идентифицируют источники акустической эмиссии, имеющие одну природу с достоверностью не менее 0,95, определяемой по отношению площадей перекрытия эллипсов рассеивания, в то время как доверительные интервалы, построенные в условиях известной дисперсии идентифицируют те же источники с достоверностью максимум 0,2.
6. Показано, что начало процесса разрушения характеризуется увеличением относительной энтропии распределения амплитуд сигнала АЭ, в то время как увеличение амплитуды сигнала АЭ начинается только на нестационарной фазе развития разрушения.
7. Показано, что такие дефекты трубопроводов, как непровар, обширная пластическая деформация, коррозионное растрескивание под напряжением, трещины и расслоения металла, идентифицируются с достоверностью не менее чем 0,98 по совокупности признаков «Средняя амплитуда сигнала АЭ, энтропия распределения вероятности амплитуд» при известных результатах локации источника АЭ и приведении результатов измерения амплитуды к стандартному расстоянию (1 м) с учетом затухания упругих волн в металле трубы.

8. Показано, что основным диагностическим признаком является положение эллипса рассеивания на координатной плоскости, как относительно координатных осей, так и относительно ранее построенных эллипсов рассеивания. При этом степень опасности источника может быть оценена по расстоянию между геометрическим центром эллипса рассеивания и уровнем амплитуд сигнала АЭ, характерного для бездефектного образца.
9. Разработанная методика идентификации источников акустической эмиссии на основе комплексных информативных параметров прошла апробацию и внедрена на ГУП «Гормост», а также рекомендации, содержащиеся в ней, учтены при разработке «Методики наружного обследования трубопроводов методами акустико-эмиссионного контроля» РАО «Газпром».

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ ОПУБЛИКОВАНО В РАБОТАХ:

1) Об информативности параметров акустической эмиссии при диагностике сварных соединений / В.В. Шип, И.С. Самойлова, Е.Г. Дорохова, Г.А. Бигус // Современные проблемы сварочной науки и техники: Тез. докл. – Ростов-н/Д., 1993. – С.21.

2) Новые методика и аппаратура акустико-эмиссионного контроля сварных трубопроводов / В.В. Шип, Г.А. Бигус, А.Н. Дементьев, И.С. Самойлова, Е.Г. Дорохова // Неразрушающий контроль в науке и индустрии – 94: Тез. докл. – М., 1994. – С.194.

3) В.В. Шип, Е.Г. Дорохова. Новые комплексные информативные параметры акустической эмиссии для диагностики сварных соединений. //Сварочное производство. - 1995.-№3 (724).- С.35-38.

4) В.В. Шип, В.Ф. Чабуркин, Е.Г. Дорохова. Новые критерии распознавания источников акустической эмиссии при диагностике трубопроводов. Тез. Докл.- М, 1995.- С 19.

5) The application of complex information parameter to acoustic emission for diagnostic during the stage of fracture. / V.V. Ship, G.B. Muravin, I.S. Samoilova, E.G. Dorokhova //Nondestr. Test. Eval.- 1997.-V.13.-P.57-71.

6) Акустико-эмиссионная система диагностики состояния ответственных металлоизделий. / В.В. Шип, Г.А. Бигус, Е.Г. Дорохова, И.С. Самойлова // Неразрушающий контроль и техническая диагностика. - 1997. - № 3. - С.56-59.

7) Г.А.Бигус, Е.Г.Дорохова. Идентификация источника АЭ на основе параметров распределения вероятности амплитуды сигнала АЭ // Неразрушающий контроль и техническая диагностика. – 1998. - № 3. - С. 25-31.

8) Критерии распознавания источников АЭ, основанные на параметрах амплитудных распределений (АР) сигналов акустической эмиссии, в условиях шумовой помехи / Г.А. Бигус, Е.Г. Дорохова // Неразрушающий контроль и диагностика: Тез. докл., – М., 1999. – С. 118.