



ИНФОРМАТИВНЫЕ ПАРАМЕТРЫ И СХЕМЫ АКУСТИКО-ЭМИССИОННОГО КОНТРОЛЯ

УДК 667.64:678.02

МАРАСАНОВ Владимир Васильевич

д.т.н., профессор кафедры технической кибернетики Херсонского национального технического университета.

Научные интересы: интеллектуальные системы принятия решений, методы обработки многомерных данных.

ШАРКО Артем Александрович

студент кафедры технической кибернетики Херсонского национального технического университета.

Научные интересы: методы и модели обработки данных.

КОБЕРСКИЙ Владислав Витальевич

Аспирант кафедры технической кибернетики Херсонского национального технического университета

Научные интересы: Датчики систем АЭ контроля. Информационное обеспечение многоканальных систем АЭ контроля.

ШАРКО Александр Владимирович

д.т.н., профессор кафедры энергетики, электротехники и физики Херсонского национального технического университета

Научные интересы: интеллектуальные системы принятия решений, методы обработки многомерных данных.

ВВЕДЕНИЕ

Применение явления акустической эмиссии (АЭ) базируется на представлениях, что процессы деформирования и разрушения служат источниками эмиссии. Общая постановка задачи создания систем АЭ контроля сводится к обнаружению сигнала на фоне помех, измерению его параметров, оценке связи принятых сигналов с характером развивающегося дефекта. Поскольку АЭ метод позволяет обнаружить ранние стадии трещинообразования, предшествующие катастрофическому разрушению нагруженных конструкций, было принято много попыток к определению расчетных соотношений, связывающих параметры АЭ с характеристиками микро- и макро трещин в материалах [1, 2, 5, 8, 11]. Эта довольно непростая задача в полной мере не решена и до настоящего времени.

АНАЛИЗ ПУБЛИКАЦИЙ

ПО ОБОЗНАЧЕННОЙ ПРОБЛЕМЕ

Аналитическая оценка обнаружения источника АЭ на фоне помех выполняется на базе анализа и обобщения большого объема информации, обработка которой связана с большими методическими трудностями [1-5]. Поскольку разрушение материала косвенно определяется характером нагружения, который априори не известен, возникает неопределенность в распознавании полезных сигналов [6-8]. Поэтому с целью исключения возможных ошибок для количественных оценок результатов контроля необходимо введение вероятностных представлений.

Целью работы является обоснование информативных параметров характеристик акустических сигналов при АЭ контроле развивающихся дефектов.

ИЗЛОЖЕНИЕ ОСНОВНОГО МАТЕРИАЛА

Практические реализации метода АЭ в основном используют детерминированную модель, которая является частным случаем статистической.

Для статистической модели обработки информации вводятся следующие ограничения:

- сигнал АЭ имеет стационарные характеристики, т.е. его Фурье-образ не изменяется за небольшое время и становится инвариантом источника;

- интенсивность помехи уменьшается с уменьшением размера контролируемого участка;

- сигнал АЭ в точке излучения представляет собой импульсный пуассоновский процесс;

Импульсы АЭ характеризуются амплитудой, длительностью, формой, частотным спектром, временем проявления (рис.1).

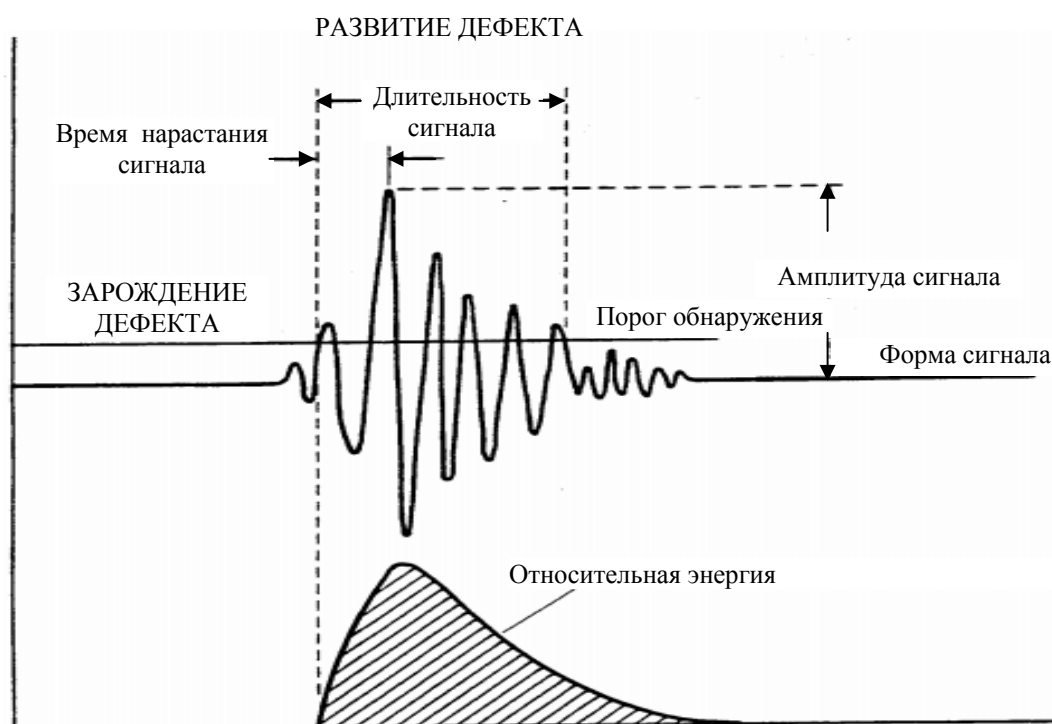


Рис. 1 – Типичная форма АЭ сигнала

Потоком АЭ-сигналов называется последовательность импульсов, у которых случайными величинами является амплитуда и время появления.

Поток сигналов можно характеризовать:

- средним значением амплитуды импульсов;
- дисперсией амплитуды;
- амплитудным распределением;

- амплитудно-временным распределением;

- распределением временных интервалов между импульсами;

- средней частотой их появления;

- спектральной плотностью;

- корреляционной функцией.

Характеристиками акустического излучения, используемыми на практике, являются амплитуда, амплитудное распреде-

ление и амплитудно-временное распределение. Факторы, влияющие на амплитудно-временное распределение импульсов АЭ, представлены в табл.1.

Таблица 1

Факторы, влияющие на режимы АЭ диагностики

Повышение амплитуды АЭ сигнала	Понижение амплитуды АЭ сигнала
Высокая прочность и низкая пластичность материала	Низкая прочность материала и высокая пластичность
Высокая скорость нагружения и деформирования	Низкая скорость нагружения и деформирования
Анизотропия свойств контролируемого материала	Изотропность структуры материала
Неоднородность материала	Однородность материала
Большая толщина конструкции	Малая толщина конструкции
Низкая температура материала	Высокая температура материала
Повышенная дефектность структуры материала	Бездефектность структуры материала
Крупнозернистая структура материала	Малый размер зерна
Высвобождение упругой энергии за счет трещинообразования	Высвобождение упругой энергии за счет пластичного деформирования
Отсутствие текстуры материала	Наличие текстуры материала

Амплитудное распределение импульсов АЭ - $n(A)$ – функция, указывающая количество импульсов с амплитудой от A до $A + dA$. Она определяет общее число зарегистрированных импульсов N_{Σ} за время наблюдения

$$N_{\Sigma} = \int_0^{\infty} n(A)dA$$

С амплитудным распределением связана функция плотности вероятности $w(A)$. Она определяет вероятность того, что амплитуда A' находится в заданном интервале

$$P\{A < A' < A + dA\} = w(A)dA$$

Плотность вероятности удовлетворяет условию нормировки

$$\int_0^{\infty} w(A)dA = 1$$

Плотность вероятности $w(A)$ и амплитудное распределение импульсов $n(A)$ связаны между собой:

$$w(A) = \frac{n(A)}{N_{\Sigma}}$$

Для непрерывной АЭ вместо амплитудного распределения следует использовать плотность вероятности АЭ, определяющую долю времени наблюдения, в течении которого регистрируемая величина находится в интервале вблизи заданного значения амплитуды.

Пример такого распределения представлен на рис.2 [1], где показана зависимость непрерывной эмиссии от микроструктуры ферритно-перлитной стали, в условиях недоотжига, оптимального отжига и переотжига.

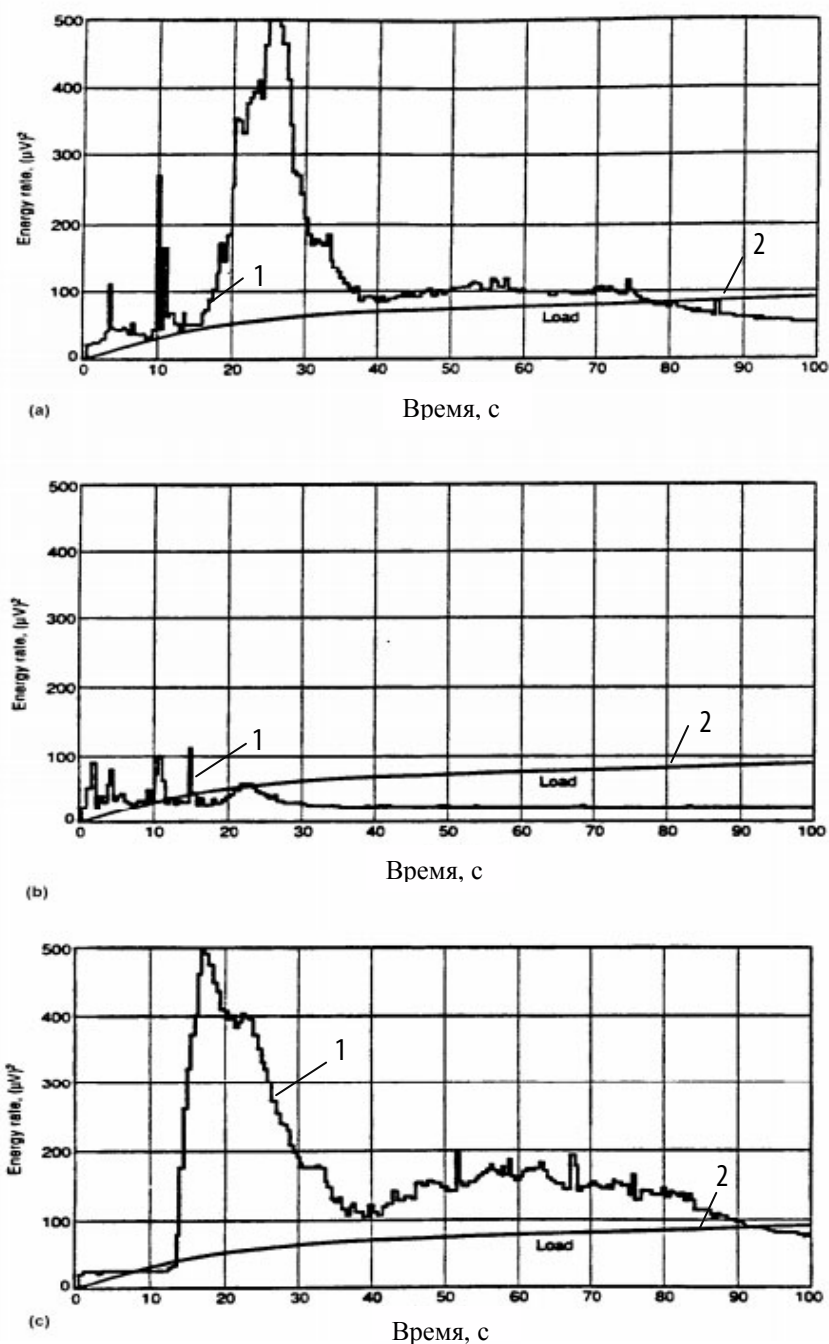


Рис.2. Графики зависимости скорости изменения энергии (1) и нагрузки (2) от времени. (а) недоотоженная сталь. (б) оптимально отожженная сталь. (с) переотоженная сталь.

Образцы, подвергшиеся оптимальному отжигу, демонстрируют значительно меньшую активность эмиссии. При пластическом деформировании дислокации скапливаются на границе перлитных пластинок, вызывая разрушение, и вызывают

появление первого пика эмиссии на кривой нагружения.

При испытании недоотоженного материала происходит накопление дислокаций, приводящее к повышению АЭ активности. При оптимальном отжиге, эти пла-

стинки приобретают сферическую форму, дающие меньшее число границ и барьеров для скопления дислокаций. Оптимальный режим отжига приводит к минимальной эмиссии. Это позволяет рекомендовать АЭ метод для контроля термической обработки материала.

Накопление сведений о развивающихся дефектах содержится и в информации о распределении временных интервалов между отдельными импульсами. При взаимной независимости элементарных событий, приводящих к АЭ, и одинаковой интенсивности протекания событий, поток АЭ сигналов описывается законом Пуассона, согласно которому вероятность зарегистрировать N импульсов за время t определяется соотношением

$$P(N, t) = \left\{ \frac{(vt)^N}{N!} \right\} \exp\{-vt\}$$

где v – интенсивность потока, т.е. среднее число импульсов АЭ в единицу времени.

Если интенсивность потока $v(t)$ изменяется со временем, то вероятность зарегистрировать N импульсов за время t можно рассчитать по формуле

$$P(N, t) = \left[\frac{\left(\int_0^t v(t) dt \right)^N}{N!} \right] \exp\left\{ - \int_0^t v(t) dt \right\}$$

Пример такого распределения представлен на рис. 3 [5], где показаны результаты измерений зависимости интенсивности АЭ сигнала N и ее амплитуды A от времени t при возрастании приложенной нагрузки для образца из алюминиевого сплава Д16. Корреляцию информативных параметров с развитием дефекта установ-

ливают при испытаниях на эталонных образцах, в процессе которых регистрируют приложенную нагрузку P .

Первый скачок трещины, связанный с релаксацией нагрузки, определяется по появлению сигнала, амплитуда которого значительно превышает начальные. Продвижение трещины отображается в виде амплитудного распределения сигналов АЭ. Устанавливая определенные уровни дискриминации, можно выделить сигналы, связанные с продвижением трещины.

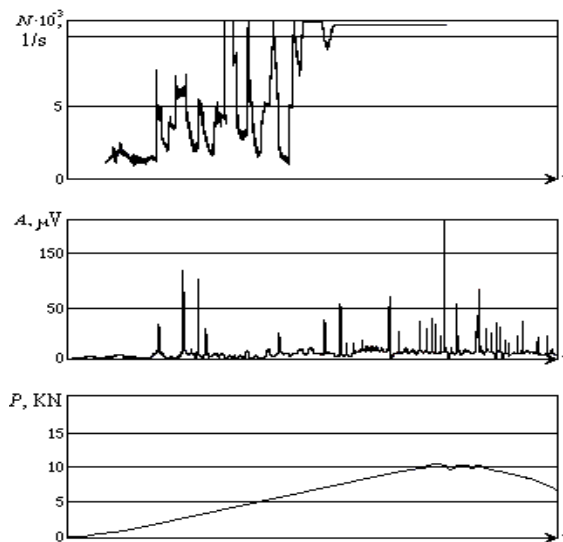


Рис.3. Временная зависимость интенсивности и амплитуды сигнала АЭ от приложенной нагрузки в эталонном образце

Динамику физических процессов, сопровождающих излучение АЭ отражает амплитудно-временное распределение АЭ $n(A, t)$, т.е. функция, указывающая количество импульсов АЭ dN , зарегистрированных в промежутке времени от t до $t + dt$, амплитуда которых заключена в интервале от A до $A + dA$:

$$dN = n(A, t) dA dt$$

Если полное время регистрации АЭ находится в интервале от 0 до T , то

$$n(A) = \int_0^T n(A, t) dt$$

$$N_{\Sigma} = \int_0^T \int_0^{\infty} n(A, t) dt dA$$

Анализ амплитудного распределения и его изменение со временем позволяет

проследить развитие физических процессов, являющихся источником АЭ-сигнала, в частности, проследить рост поврежденности материала в будущем очаге разрушения.

Пример такого распределения, выполненного в [9], представлен на рис. 4.

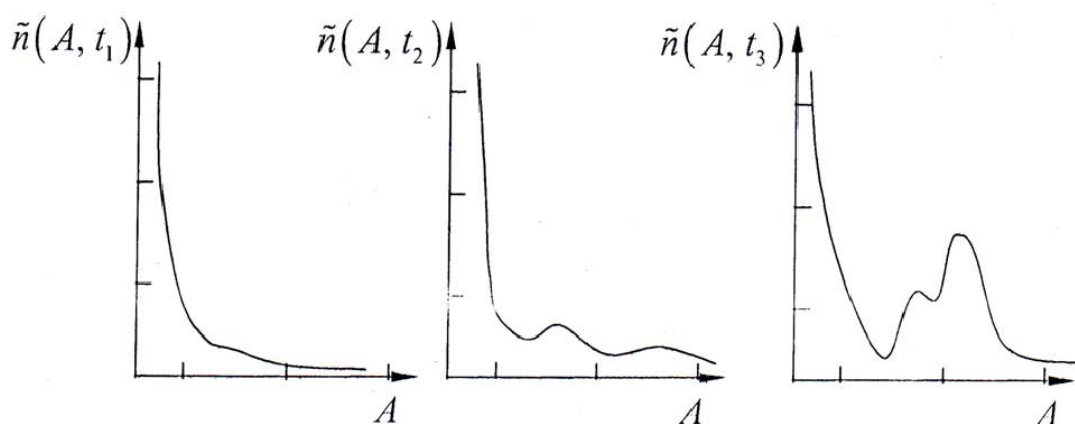


Рис.4. Изменение амплитудного распределения АЭ-сигналов со временем при нагружении стального образца со сварным соединением под действием постоянной растягивающей нагрузки.

По мере увеличения времени в амплитудном распределении возрастает доля импульсов АЭ с высокой амплитудой, что свидетельствует о формировании и развитии очага разрушения в сварном соединении.

Форма импульса определяется также передаточными функциями элементов акустического тракта и частотной полосой приемного преобразователя. Поскольку затухание увеличивается с пройденным расстоянием и сильно возрастает с увеличением частоты, то в регистрируемом сигнале АЭ преобладают низкочастотные

составляющие. Так как произведение ширины спектра импульса Δf на его длительность $t_{имп}$ равно единице, то затухание высокочастотных составляющих спектра и следовательно, уменьшение его ширины, приводит к увеличению длительности регистрируемого сигнала.

Составленная авторами на основании обзора литературных источников классификация функциональных назначений и схем локализации источников акустической эмиссии представлена на рис.5[10].

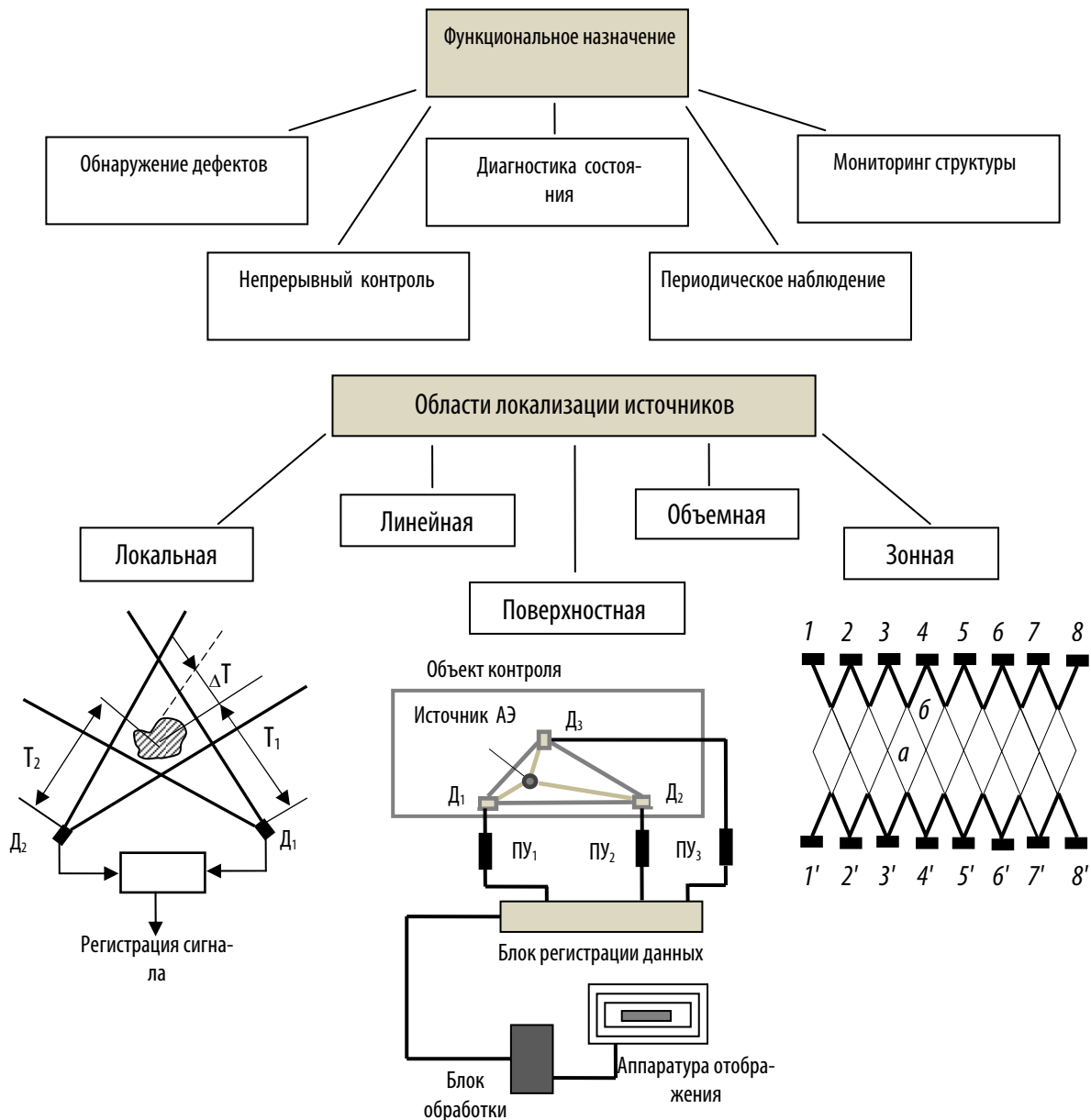


Рис.5. Классификация функциональных назначений и схем локализации источников АЭ

В пределах предложенной классификации системы контроля методы АЭ

могут различаться типом применяемых преобразователей, схемами их размещения, методами обработки аналоговой и цифровой информации, степенью автоматизации процедуры принятия решений.

Для осуществления локализации источника волн напряжений необходимо правильно образом расположить нужное количество датчиков. Классификация

схем расположения датчиков представлена на рис. 6.

Отмеченные особенности определили направления формирования акустического тракта диагностического оборудования.

Импульс АЭ обладает широким частотным спектром, являясь суперпозицией множества упругих волн разной частоты. Дисперсия приводит к фазовому сдвигу между частотными составляющими им-

пульса. В результате форма регистрируемого импульса искажается пропорционально расстоянию между источником и приемником АЭ сигнала.

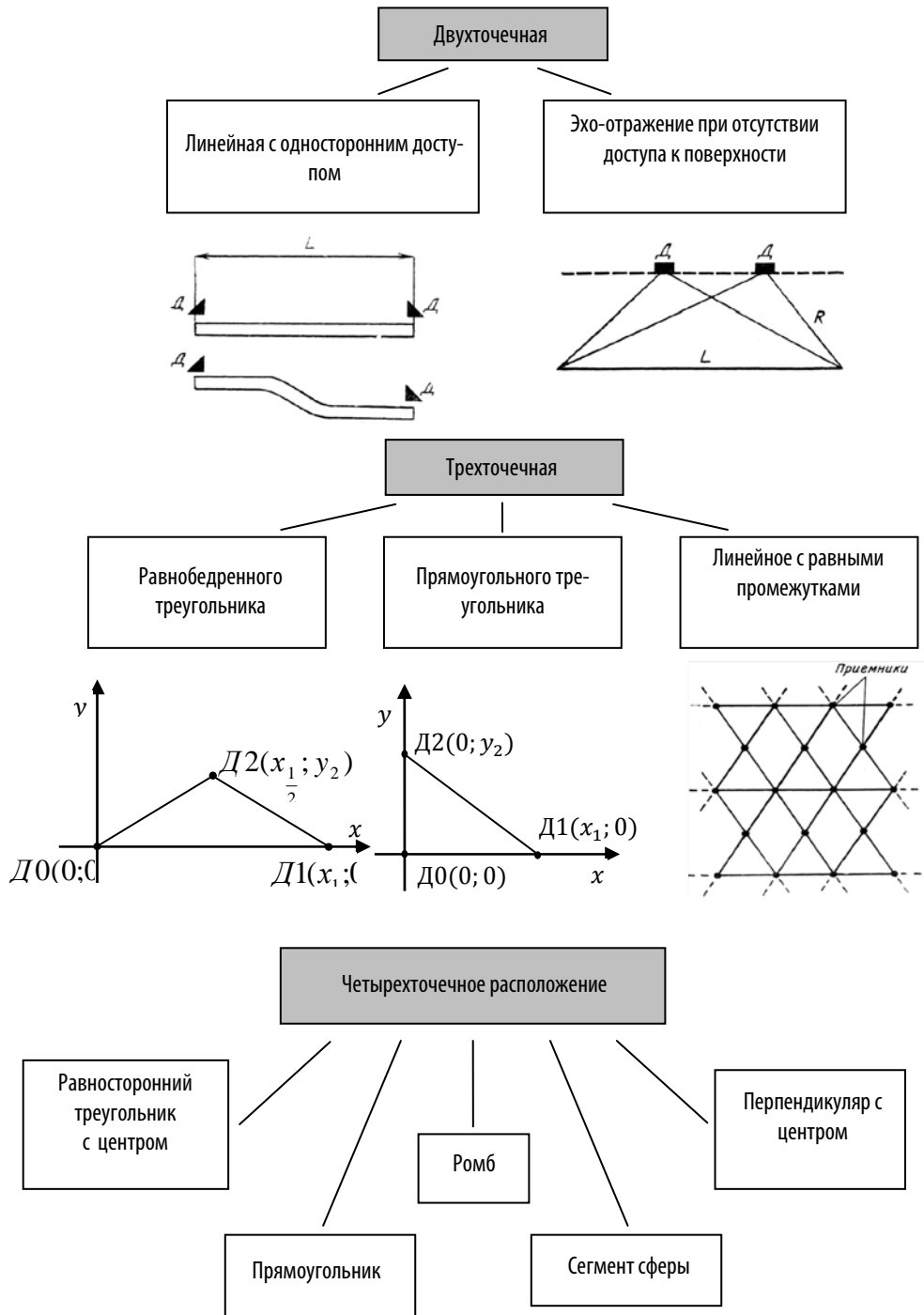


Рис.6. Схемы и конфигурации расположения датчиков

Практический интерес для неразрушающего контроля представляет получение статистических оценок параметров АЭ. Для этого используется узкополосная

аппаратура, позволяющая измерять как отдельные параметры формы сигналов, так и регистрировать их большие потоки.

Если регистрация АЭ проводится преобразователем с узкой полосой пропускания, который, как правило, обладает более высокой чувствительностью по сравнению с широкополосным, то частота АЭ-сигнала определяется основной частотой преобразователя. После усиления и детектирования импульса определяется его огибающая, максимальное значение которой принимается за амплитуду АЭ-сигнала.

Оптимизация параметров степени обработки информации производится в направлениях: оптимальной частотной фильтрации помех и оптимальной пространственной фильтрации. Оптимизация частотной фильтрации помех производится по параметрам максимизации отношения энергий сигнала и помех

Оптимизация пространственной фильтрации производится по параметру минимизации интенсивности помех и реализуется применением направленных акустических приемников или использованием многоточечной приемной антенны. Этот процесс количественно описывается с помощью учета коэффициента концентрации γ [5].

$$\gamma = \frac{2}{\int_0^{\pi} R^2(\alpha) \sin \alpha d\alpha},$$

где $R(\alpha)$ – диаграмма направленности приемника.

Для приемников поверхностных волн величина γ равна

$$\gamma = \frac{2l}{\lambda} = \frac{2\omega l}{\pi v},$$

где l – размер приемного элемента в направлении перпендикулярном оси приема;

ω – круговая частота;

v – скорость распространения волны.

Согласно теории оптимальной фильтрации энергетическая переходная функция K связана с оптимальной частотой обработки и расстоянием от источника до центра пьезоантенны соотношением [5].

$$K = \sqrt{L(\omega, r) \gamma C G_{\Pi}},$$

где G_{Π} – энергетический спектр помех в зоне установки пьезоантенны;

C – коэффициент усиления;

$L(\omega, r)$ – передаточная функция среды;

r – расстояние от источника до центра пьезоантенны.

Основной принцип технической реализации получения информации о развивающихся дефектах при АЭ контроле сводится к обнаружению и индикации сигнала, его усилению, частотной фильтрации, дискриминации и нормировке импульса по длительности и амплитуде.

ВЫВОДЫ

Наиболее информативными параметрами акустико-эмиссионного контроля следует считать параметры отдельных импульсов дискретной АЭ, потоки импульсов и параметры непрерывной АЭ.

Для непрерывной АЭ фиксируется число выбросов случайного процесса над заданным уровнем дискриминации. Форма импульса определяется физическим процессом, в результате которого появилось акустическое излучение, передаточными функциями элементов акустического тракта, по которому распространяется акустический импульс от места возникновения до приемного преобразователя, частотной полосой приемного преобразователя.

При практической реализации метода АЭ наиболее информативными являются амплитуда, амплитудное распределение и амплитудно-временное распределение.

При оценке информативности диагностических параметров АЭ контроля важное значение имеет реакция на изменение структуры параметра материала контролируемого изделия, т.е. чувствительность,

определяемая как отношение относительных изменений диагностических и структурных параметров. Чем больше реагирует на изменение структурного параметра диагностический параметр, тем выше чувствительность метода и тем на более ранней стадии можно определить неисправность.

ЛИТЕРАТУРА

1. Pollok Andrian. Acoustic Emission Inspection / A.Pollok // Metals Handbook. Ninth Edition ASM International 1989-V17-p.p. 278-294.
2. Andrejkin A.E. Metod akusticheskoj e`missii v issledovanii processov razrusheniya / A.E. Andrejkin, N.V. Ly'sak / K.: Naukova dumka, 1989. – 137 s.
3. Barabash Yu.L., Varskij B.V., Zinov`ev V.T., Kirichenko V.S., Sapegin V.F. Voprosy' statisticheskoj teorii raspoznavaniya. Pod.red. B.V. Varskogo. M.: Sov.radio, 1967. – 399 s.
5. Gutkin L.S. Teoriya optimal'ny'x metodov radiopriema pri fluktuacionny'x pomexax / L.S. Gutkin / M.: Sov.radio, 1972. – 448 s.
6. Akusticheskaya e`missiya i ee primeneniye dlya nerazrushayushhego kontrolya v yadernoj e`nergetike / Artyuxov V.I., Vakar K.B., Ovchinnikov N.I., Perevezenczev V.N. i dr. / Pod red.K.B. Vakara. M.: Atomizdat, 1980. – 216 s.
7. Bulaev V.V., Kotov I.N., Telesnin B.A. Obrabotka i poisk akusticheskix signalov v mul`timedijnoj baze dannyx / Izvestiya Yuzhnogo federal'nogo universiteta: texnicheskie nauki, 2002. – T.25. – S. 96-107.
8. Metod akusticheskoj e`missii dlya diagnostiki sudov davleniya na neftepererabaty'vayushhem zavode [e`lektronny'j resurs]. Rezhim dostupa <http://www.panatest.ru/print?id=metod-aetype=static>
9. Por G., Doszpod L., Dobjan T. Developing an Acoustic Emission Measuring System Based on Modular High Speed Data Acquisition Devices / 30th European Conference on Acoustic Emission Testing 2012 – 12-15 September. www.ndt.net/EWGAE-ICAE2012
10. Apasov A.M. Issledovanie signalov AE` pri staticheskom nagruzenii ploskix obrazczov iz vy`sokoprochnoj stali / A.M.Apasov Izvestiya Tomskogo politexnicheskogo universiteta 2010 -T.316-№2 - S.36 -41
11. Marasanov V.V. Issledovanie metodov i ustrojstv obrabotki signalov akusticheskoj e`missii./ V.V. Marasanov, A.A. Sharko/ Materiali IV Vseukraïns`koï naukovopraktichnoï konferencii studentiv, aspirantiv ta molodix vchenix z avtomatichnogo upravlinnya prisvyachenoï dnyu kosmonavtiki/ pid red. V.V. Marasanova. Xerson XNTU 2016 - S.128-134
12. Marasanov V.V. Modeli obrabotki dannyx v sisteme opredeleniya defektov metodom akusticheskoj e`missii / V.V. Marasanov, A.A. Sharko // Problemi informacijnix tehnologij, 2015. – № 02(018). – S. 52-56
13. Marasanov V.V. Sistemnaya klassifikaciya kriteriev ocenki texnicheskogo sostoyaniya ob`ektov po istochnikam akusticheskix signalov/ V.V. Marasanov, A.V.

Рецензент: д.т.н., проф. Рудакова А.В.
Херсонский национальный технический университет