

На правах рукописи
УДК 621.791.052.08

61.04
НА ДС
ВЫДАЕТСЯ

ИГНАТОВ Виталий Викторович

**РАЗРАБОТКА МЕТОДИКИ АКУСТИКО-ЭМИССИОННОГО
ДИАГНОСТИРОВАНИЯ ПОДЗЕМНЫХ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ
ТРУБОПРОВОДОВ**

**Специальность 05.02.11 – Методы контроля и диагностика
в машиностроении**

**Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук**



Работа выполнена в Российском государственном университете нефти и газа им. И.М. Губкина

Научный руководитель – доктор технических наук, профессор
Зорин Е.Е.

Официальные оппоненты – доктор технических наук, профессор
Барзов А.А.

кандидат технических наук
Бородин Ю.П.

Ведущая организация – ГУП «МОСВОДОКАНАЛ»

Защита состоится 20 июля 2005 г. на заседании диссертационного
совета Д212.141.01 при МГТУ им. Н.Э. Баумана по адресу:
105005, 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.

Автореферат разослан 26 июля 2005 г.
Телефон для справок: 267-09-63

УЧЕНЫЙ СЕКРЕТАРЬ
ДИССЕРТАЦИОННОГО СОВЕТА



к.т.н., доц. Коновалов А.В.



Подписано к печати 24.05.05г.
Заказ № 155

Объем 1,0 п.л. Тираж 100 экз.
Типография МГТУ им. Н.Э. Баумана

899

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность проблемы. В настоящее время около 60-70% оборудования промышленных предприятий, к которому также относятся и технологические трубопроводы, уже выработало установленный срок службы, что неизбежно приводит к росту числа отказов.

Таким образом, одним из приоритетных направлений повышения безопасности оборудования является разработка и применение современных методов и средств неразрушающего контроля, позволяющих как выявить дефекты, так и оценить работоспособность эксплуатируемого оборудования с учетом параметров выявленных дефектов.

Совместное использование традиционных методов и средств неразрушающего контроля, таких как радиографический, ультразвуковой, магнитный, визуальный, позволяет выявлять практически все возможные типы дефектов при условии свободного доступа к поверхности трубопровода. Однако своевременное выявление и оценка степени опасности дефектов в трубопроводах подземной прокладки часто оказывается невозможной, из-за резкого сокращения номенклатуры применяемых методов и средств неразрушающего контроля.

При этом наибольшее влияние на работоспособность трубопроводов оказывают плоскостные дефекты, которые являются опасными концентраторами напряжений и в процессе эксплуатации могут приводить к образованию трещин.

Развитие дефектов до момента отказа сварной конструкции является достаточно длительным процессом, сопровождающимся излучением ультразвуковых волн из вершины трещины при локальной динамической перестройке структуры металла. Для регистрации данного процесса возможно применение акустико-эмиссионного (АЭ) метода неразрушающего контроля, позволяющего по своей физической природе выявить и оценить степень опасности развивающихся дефектов, которые могут находиться на значительном удалении от места доступа к поверхности конструкций, а также определить тип и условные размеры дефектов.

Однако, несмотря на перспективность метода АЭ его широкое применение для проведения диагностирования или мониторинга подземных технологических трубопроводов сдерживается из-за ряда факторов, основными из которых являются:

- невозможность доступа к поверхности конструкции для установки на нее преобразователя акустической эмиссии (ПАЭ) и невозможность проведения диагностирования участков трубопроводов, пересекающих автомагистрали, железные дороги,

БИБЛИОТЕКА

- отсутствие информации о вероятности принятия правильного решения при оценке класса опасности развивающихся дефектов.
- большие затраты, связанные с подготовкой к проведению АЭ-контроля, в частности, выемке шурфов для доступа к поверхности трубопровода,
- высокая стоимость АЭ аппаратуры, которая напрямую зависит от количества каналов, минимально необходимых для проведения обследования.

Цель работы. Повышение безопасности эксплуатации труднодоступных участков технологических трубопроводов путем своевременного обнаружения и оценки класса опасности развивающихся дефектов на базе методов неразрушающего контроля.

Для достижения поставленной цели в работе решались следующие задачи:

- Выбор метода неразрушающего контроля, позволяющего выявить и оценить степень опасности развивающихся дефектов в трубопроводах при ограниченном доступе к поверхности.
- Оптимизация выбранного метода неразрушающего контроля для возможности оценки расстояния до развивающихся дефектов в технологических трубопроводах с ограниченным и односторонним доступом к поверхности.
- Разработка алгоритма оценки достоверности результатов классификации обнаруженных развивающихся дефектов с позиции наступления предельного состояния.

Объектами исследования явились подземные технологические трубопроводы различного назначения диаметром до 300 мм и толщиной стенки до 10 мм, изготовленные из двухфазных феррито-перлитных сталей типа 10, 20.

Методы исследования. Исследования выполнялись с применением АЭ аппаратуры 1 и 2 класса, аппаратуры и средств физических методов исследований. Обработка результатов экспериментов проводилась методами теории вероятности и математической статистики с использованием современных средств вычислительной техники.

Научная новизна работы:

- Установлено, что расстояние между развивающимся дефектом в сварной конструкции и преобразователем акустической эмиссии (ПАЭ) может быть определено при использовании только одного датчика базируясь на измерении интервала времени между началом и максимумом зарегистрированного импульса акустической эмиссии (АЭ) или его огибающей.
- Показано, что точность оценки расстояния до источника АЭ зависит от вида функции, аппроксимирующей форму огибающей импульсов, отношения сигнал/порог и измеренной длительности импульсов.

- Показано, что для компенсации методических ошибок определения истинного времени нарастания сигналов АЭ целесообразно использовать корректирующие коэффициенты K_{n1} и K_{n2} , полученные расчетным путем.

- Получены зависимости, связывающие относительную ошибку определения истинной амплитуды сигнала АЭ с расстоянием до источника АЭ, коэффициентом затухания сигналов АЭ в материале и относительной погрешностью определения расстояния.

Практическая ценность работы заключается в том, что:

- Разработана методика акустико-эмиссионного диагностирования подземных технологических трубопроводов, которая прошла апробацию, и применяется ЦТД «Кодиак» при проведении экспертизы промышленной безопасности технологических трубопроводов различного назначения.

- Разработан и апробирован способ определения расстояния между источником АЭ и ПАЭ для протяженных сварных конструкций при использовании только одного датчика.

- Предложен и апробирован метод «половинного деления» для определения времени нарастания сигнала АЭ с отношением сигнал/порог $K_{с/п} < 4$.

- Разработан метод нахождения вероятности совершения ошибки при определении класса опасности источников АЭ.

На защиту выносятся следующие основные положения работы:

- Обоснование применения метода АЭ для выявления и оценки класса опасности развивающихся дефектов.

- Способ определения расстояния до развивающегося дефекта с применением только одного датчика.

- Алгоритм корректировки измеряемых АЭ аппаратурой временных параметров импульсов.

- Результаты анализа погрешностей определения амплитуды импульсов АЭ, зависящих от относительной погрешности оценки расстояния до источника АЭ, величины расстояния и коэффициента затухания материала.

- Алгоритм нахождения вероятности совершения ошибки при определении класса опасности развивающихся дефектов.

Апробация. Основные положения и результаты выполненной работы докладывались и обсуждались на:

- 55-ой межвузовской студенческой конференции (РГУ нефти и газа, 2001 г.),

- Всероссийском семинаре «Совершенствование экспертизы промышленной безопасности на опасных производственных объектах народного хозяйства», МГТУ им. Н.Э.Баумана, 2003 г.,

- Ученом совете кафедры «Сварка и мониторинг нефтегазовых сооружений» РГУ нефти и газа им. И.М. Губкина, 2004 г.

- Научно-техническом совете ООО «Нефтегаздиагностика», 2004 г.

- Научно-техническом совете кафедры «Технологии сварки и диагностики» МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2004 г.

- Всероссийском семинаре по акустико-эмиссионному методу неразрушающего контроля, Москва, 2005 г.

Публикации. Основное содержание диссертации изложено в 4 печатных трудах и 1 патенте на изобретение.

Структура и объем работы. Диссертация изложена на 145 страницах машинописного текста, состоит из введения, четырех глав и выводов, содержит 65 рисунков, 3 таблицы и список использованной литературы, включающий 69 наименований.

КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность работы, сформулированы основная цель и задачи, показана новизна и практическая ценность, приведены результаты, выносимые на защиту.

В первой главе дана краткая характеристика и условия работы технологических трубопроводов промышленных предприятий. Проведен анализ дефектов сварных соединений технологических трубопроводов показывающий, что одиночные поры и шлаковые включения в сварных соединениях при отсутствии непроваров и трещин обычно не вызывают разрушений, в то же время установлено, что основной причиной отказов сварных соединений трубопроводов является наличие плоскостных трещиноподобных поверхностных дефектов, локализованных в основном в корне шва.

Проведен анализ возможностей методов и средств неразрушающего контроля для решения следующих задач:

- выявления развивающихся дефектов в трубопроводах с ограниченной возможностью доступа к наружной поверхности,
- обнаружения развивающихся дефектов на малых и больших расстояниях (десятки метров от зоны доступа к поверхности сварной конструкции),
- обнаружения поверхностных и внутренних дефектов как в сварных швах так и в основном металле,
- обеспечения приемлемой для практики точности оценки класса опасности дефекта,
- минимизации затрат на доступ к поверхности протяженной труднодоступной сварной конструкции, минимизации требований к предварительной подготовке поверхности,
- выявления развивающихся дефектов без вывода конструкции из действия.

Сравнение возможностей, достоинств и недостатков различных методов неразрушающего контроля показало, что существует в настоящее время единственный метод обследования трубопроводов с ограниченным доступом к поверхности, наиболее полно отвечающий перечисленным выше требованиям – метод акустической эмиссии.

Выполнен анализ причин искажений сигналов АЭ при распространении по стенке трубопровода, а также шумов, сопровождающих процесс АЭ-контроля трубопроводов.

Во второй главе приведены результаты анализа существующих методов и способов определения местоположения дефектов в линейных объектах, которые показали, что ни один из них не соответствует в полной мере следующим условиям:

- наличие одностороннего доступа к поверхности объекта, что предопределяет необходимость использования одного ПАЭ,
- необходима и достаточна одномерная информация о координатах дефекта,
- аппаратная реализация метода не должна быть чрезмерно сложной,
- возможность использования АЭ-аппаратуры 1 или 2 класса.

В этой связи был разработан и апробирован способ определения расстояния до источника АЭ с применением АЭ-аппаратуры, позволяющей регистрировать форму сигнала.

Способ основан на том, что, рассматривая форму зарегистрированного сигнала АЭ как пакет различных типов волн, скорость распространения которых различна, можно выделить, по крайней мере, два признака, присущих каждому импульсу: 1) время начала импульса, которое обусловлено типом волны, имеющим наибольшую скорость после прохождения расстояния D и амплитуда которого достаточно велика, чтобы быть зарегистрированной АЭ аппаратурой, 2) время максимума амплитуды импульса или максимума его огибающей.

Суть предложенного способа заключается в том, что на одном из концов контролируемого изделия устанавливают один ПАЭ, изделие нагружают, принимают сигналы акустической эмиссии, излучаемые развивающимся дефектом, измеряют разность времени ΔT между началом сигнала и максимумом этого сигнала или максимумом его огибающей, а расстояние до источника определяется по формуле:

$$D=K*\Delta T \quad (1)$$

На основании полученных экспериментальных данных определяют функцию, аппроксимирующую коэффициент пропорциональности K , который, в частности, зависит от материала, толщины, диаметра объекта контроля, рабочей среды и т.д.

Использование предложенного дальномерного способа позволяет увеличить до 2 раз максимально возможное расстояние между двумя соседними ПАЭ по сравнению с обычно применяемым методом, использующим разность времени приема на два ПАЭ, в 2...3 раза сокращая тем самым количество зон доступа к поверхности трубопровода, необходимых для проведения АЭ-контроля, а также количество каналов аппаратуры. Кроме того, становится возможным диагностирование участков трубопроводов, пересекающих транспортные пути, когда использование большего количества ПАЭ технически невозможно.

При распространении импульса АЭ на большие расстояния амплитуда сигналов становится сравнимой с амплитудой собственных шумов аппаратуры, что является одной из причин появления ошибок при измерении величины интервала времени ΔT и, соответственно, ошибок в определении расстояний до развивающихся дефектов, которые, в свою очередь, влияют на точность оценки класса опасности развивающихся дефектов.

Кроме того, у растянутых импульсов АЭ с малым соотношением сигнал/порог часто бывает сложно выделить максимум, что может приводить к появлению больших ошибок при определении времени нарастания импульса. В этой связи был предложен и проанализирован способ «половинного деления», в соответствии с которым время, соответствующее максимуму сигнала принимается равным половине измеренной длительности импульса $\Delta t_{изм} = 0,5 \Delta t_{с\ изм}$.

Оценка точности определения значения $\Delta t_{изм}$ была выполнена при использовании двух типов аппроксимирующих функций $A = \alpha * t * e^{(1-\alpha*t)}$ и $A^2 = R^2 - t^2$,

где A – текущее значение амплитуды огибающей импульса, t – текущее время, α и R – константы, определяемые экспериментально.

Наличие порогового уровня A_n приводит к появлению ошибок, которые обусловлены порогом компаратора $\Delta t_{ош1}$ и применением способа «половинного деления» $\Delta t_{ош2}$ при определении истинных значений $\Delta t_{ист}$ и $\Delta t_{с\ ист}$ (рис. 1). При прочих равных условиях величина ошибки зависит от отношения сигнал/порог $K_{с/п} = A_c/A_n$, которое в свою очередь при прочих равных условиях зависит от расстояния D , и, чем выше пороговый уровень A_n при всех прочих равных условиях, тем больше ошибка $\Delta t_{ош1}$. Ошибка $\Delta t_{ош1}$ существует при любом типе функции, аппроксимирующей огибающую импульса.

Ошибка $\Delta t_{ош2}$ появляется, если аппроксимирующая функция несимметрична относительно значения времени $\Delta t_{ист}$, в противном случае $\Delta t_{ош2} = 0$.

Для расчета $\Delta t_{ош1}$ получена формула

$$\Delta t_{ош1} = ((-\ln(K_{с/п}) - 2) - (\ln(K_{с/п}) + 8))^{0.5} / 2 \cdot \alpha + 0,04 + 0,13 \ln(K_{с/п}) \quad (2)$$

Значение ошибки $\Delta t_{\text{ош}2}$ в соответствии с графиком на рис. 1 определяются с помощью выражений

$$\Delta t_{\text{ош}2} = \Delta t_{\text{с изм}} / 2 - \Delta t_{\text{ист}} + \Delta t_{\text{ош}1}, \quad (3)$$

Расчеты показывают, что диапазон изменения величины относительных ошибок составляет $(\Delta t_{\text{ош}1})_{\text{отн}} = 1 \dots 42 \%$, $(\Delta t_{\text{ош}2})_{\text{отн}} = 4 \dots 30 \%$ при изменении величины коэффициента сигнал/порог $K_{\text{с/п}} = 1 \dots 10$. С увеличением отношения сигнал/порог $(K_{\text{с/п}})_{\text{относительная}}$ ошибка $(\Delta t_{\text{ош}2})_{\text{отн}}$ возрастает, а $(\Delta t_{\text{ош}1})_{\text{отн}}$ - уменьшается.

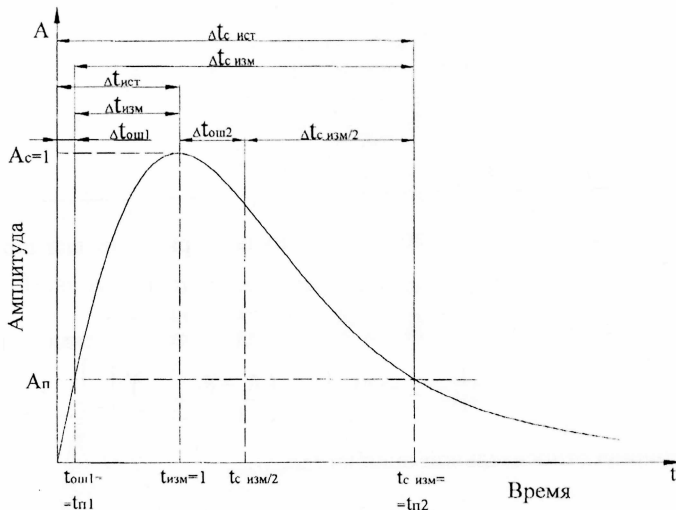


Рис. 1 Временные характеристики импульса при аппроксимировании функцией $A = \alpha * t * e^{(1-\alpha * t)}$.

Был также выполнен расчет величин поправочного коэффициента $K_{\text{п}} = f(K_{\text{с/п}})$, необходимых для корректировки измеренного интервала времени $\Delta t_{\text{изм}}$. Результаты расчетов показали, что величина корректирующего коэффициента $K_{\text{п}}$ есть функция одной переменной и величина коэффициента находится в диапазоне $K_{\text{п}} = 2,8 \dots 1,06$ при изменении $K_{\text{с/п}} = 1 \dots 10$. В итоге получена аппроксимирующая зависимость, описывающая величину корректирующего коэффициента $K_{\text{п}}$.

$$K_{\text{п}} = 1,148 - 0,0074 K_{\text{с/п}} \quad \text{при } 15 > K_{\text{с/п}} > 4 \quad (4)$$

$$K_{\text{п}} = 1 \quad \text{при } K_{\text{с/п}} > 15 \quad (5)$$

Анализ полученных данных показал, что при $K_{\text{с/п}} < 4 \dots 5$ поправочный коэффициент $K_{\text{п}}$ использовать нецелесообразно.

При малом отношении сигнал/порог ($K_{\text{с/п}} < 4 \dots 5$) аппроксимировать огибающую сигнала АЭ предлагается окружностью со смещенным центром от

носителем нуля развертки осциллографа, регистрирующего импульс АЭ. На рис. 2 ось развертки осциллографа представлена в виде оси t' , смещенной вверх относительно оси времени t ; ось A - вертикальная развертка осциллографа, отражающая амплитуду импульсов АЭ.

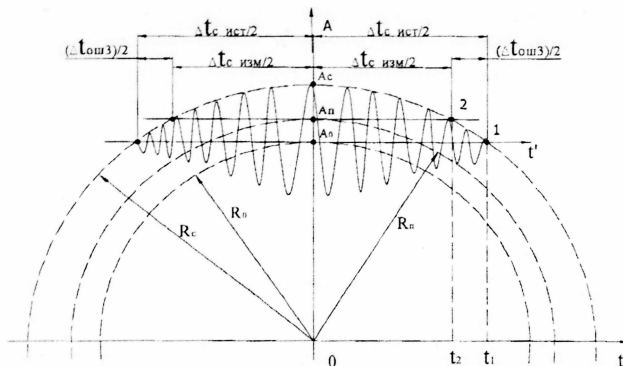


Рис. 2 Временные характеристики импульса при аппроксимировании функцией $A^2 = R^2 - t^2$

Величина абсолютной ошибки $\Delta t_{омз}$ определяется зависимостью

$$\Delta t_{омз} = 2 \left\{ \left(R_c^2 - R_0^2 \right)^{0.5} - \left[R_c^2 - \left(\frac{R_c - R_0}{K_{c/n}} + R_0 \right)^2 \right]^{0.5} \right\} \quad (6)$$

Величина относительной ошибки $(\Delta t_{омз})_{отн}$

$$(\Delta t_{омз})_{отн} = \left\{ 1 - \left[R_c^2 - \left(\frac{R_c - R_0}{K_{c/n}} + R_0 \right)^2 \right]^{0.5} / \left(R_c^2 - R_0^2 \right)^{0.5} \right\} 100\% \quad (7)$$

где R_c , R_n , R_0 - радиусы окружностей, имеющих один центр, совпадающий с нулевой точкой по оси времени t и амплитуды A .

Наличие существенных по величине ошибок определения длительности импульса при малых величинах сигнал/порог обуславливает необходимость введения поправок к результатам измерений. В этой связи, для сигналов с отношением $K_{c/n} < 4...5$ целесообразно вводить поправочный коэффициент $K_{n2} = 1 + \Delta t_{омз} / \Delta t_{изм}$.

Влияние соотношения амплитуды к длительности импульса на величину абсолютной и относительной ошибки, а также на значения поправочного коэффициента K_{n2} при использовании метода «половинного деления» было исследовано путем варьирования величины R_0 в диапазоне $R_0 = 6...100$, отношения сигнал/порог $K_{c/n}$ в диапазоне $K_{c/n} = 1.5...5$, разности $(R_c - R_0)$ в диапазоне $(R_c - R_0) = 3...10$ при неизменной разности $(R_n - R_0) = const = 2$ (рис 3).

С помощью полученных на рис. 4 графических зависимостей величина поправочного коэффициента $K_{\alpha 2}$ определяется как абсцисса точки пересечения кривой отношения сигнал/порог $K_{c/n} = const$ с измеренным значением длительности импульса $\Delta t_{изм}$ при варьировании значений радиусов R_0 .

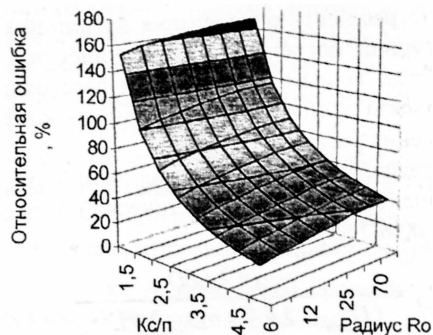


Рис. 3 Зависимость относительной ошибки $(\Delta t_{ош.з})_{отн}$ от величины отношения сигнал/порог $K_{c/n}$ и радиуса R_0 .

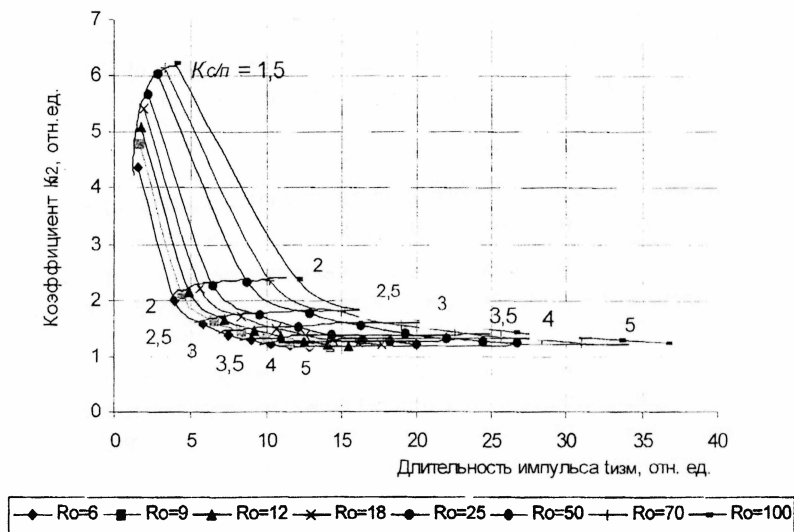


Рис. 4 Зависимость, связывающая поправочный коэффициент $K_{\alpha 2}$ с отношением сигнал/порог $K_{c/n}$ и измеренной длительностью импульса $\Delta t_{изм}$ при варьировании значений $R_0=6 \dots 100$.

Нормативная документация по АЭ-контролю требует производить пересчет измеренных значений параметров импульса АЭ, в частности амплитуды, с учетом пройденного расстояния. В этой связи была выполнена оценка погрешности измерения амплитуды, обусловленная ошибкой в определении расстояния до развивающегося дефекта.

Абсолютная погрешность определения истинной величины амплитуды, без учета аппаратурной погрешности, погрешности градуировки, влияния внешней среды и т.д., зависит от истинного расстояния $D_{ист}$ до источника АЭ, материала объекта контроля (учитываемого коэффициентом a) и погрешности определения расстояния δD .

Получены выражения для определения величины абсолютной ошибки $\delta A_{1,2}$ измерения амплитуды сигнала акустической эмиссии с учетом влияния параметров $D_{ист}$, a , δD :

$$\delta A_{1,2} = \frac{-a * 2 * \delta D}{(D_{ист}^2 \pm 2 * \delta D * D_{ист}) * D_{ист}}, \quad (8)$$

а также - для модуля приведенной ошибки $|\delta A_{1,2}|_{прив}$

$$|\delta A_{1,2}|_{прив} = \frac{2 * a * \gamma_{1,2}}{D_{ист}^2 * (1 \pm 2 * \gamma_{1,2})} \quad (9)$$

где $\gamma_1 = \delta D_2 / D_{ист} < 0$, $\gamma_2 = \delta D_1 / D_{ист} < 0$, δD_1 и δD_2 - погрешности оценки расстояния D с отрицательным и положительным знаком, соответственно.

Анализ результатов расчетов показывает, что:

- величина приведенной погрешности оценки амплитуды резко возрастает при малых расстояниях до источника АЭ,
- для объектов с большим затуханием влияние величины приведенного расстояния $(D)_{прив}$ на приведенную погрешность амплитуды существенно меньше, чем для объектов с относительно малым затуханием,
- чем больше величина относительной погрешности определения расстояния γ , тем существеннее ее влияние на точность определения амплитуды импульса, это влияние тем больше, чем меньше значение приведенного расстояния,
- соотношение величин ошибок $\delta A_1 / \delta A_2$ существенно возрастает с ростом погрешности оценки расстояния, определяемой коэффициентом γ .

В третьей главе приведены результаты экспериментальных исследований сигналов АЭ в лабораторных и заводских условиях.

При проведении экспериментов в основном использовались предварительный и основной усилители с полосой пропускания 20...400 кГц, ПАЭ типа П113 (0,02-0,2), запоминающий цифровой осциллограф с частотой квантования сигнала 2 МГц.

В качестве имитатора развивающегося дефекта использовался ПАЭ, работающий в режиме излучения, а также имитатор Хсу-Ниелсена. Длительность возбуждающего импульса составляла не более 1 мкс при использовании ПАЭ в качестве имитатора. Для уменьшения погрешности измерений проводилось не менее 6 запусков имитатора. Обычно имитатор устанавливался перпендикулярно к поверхности трубопровода через масляную прослойку. Таким же образом устанавливался приемный ПАЭ. Аппроксимация результатов экспериментов, выполненных в лабораторных и производственных условиях, осуществлялась с помощью полиномов 1-4 степени.

В лабораторных условиях эксперименты проводились на стальных трубах $\varnothing 21 \times 3$ мм, $\varnothing 32 \times 4$ мм, $\varnothing 59 \times 4$ мм и $\varnothing 77 \times 6$ мм.

Экспериментально подтверждена зависимость измеряемого интервала времени ΔT от ориентации имитатора, который устанавливался на торце труб, а также на поверхности трубы в положении 0° , 90° , 180° относительно горизонтальной плоскости. Анализ полученных данных показал, что при небольших расстояниях (до 1,5 м) положение датчика относительно имитатора оказывает влияние на зависимость $D=f(\Delta T)$, на больших расстояниях это влияние несущественно.

Сравнение результатов экспериментов, проведенных с использованием широкополосных ($f=0,02...0,4$ МГц) и узкополосных ПАЭ (основной резонанс около $f_p=100$ кГц), выполненных на трубе $\varnothing 77 \times 6$ мм, показывает, что при всех прочих равных условиях изменение ширины полосы пропускания ПАЭ не оказывает сильного влияния на зависимость $D=f(\Delta T)$. В частности, диапазон изменения интервала времени ΔT на трубе $\varnothing 77 \times 6$ мм составляет 100...900 мкс и 110...823 мкс для широкополосного и узкополосного ПАЭ, соответственно.

Сравнение результатов экспериментов, проведенных с использованием ПАЭ в режиме излучения и источника Хсу-Ниелсена при имитации сигналов АЭ на торце труб, показало, что наблюдается расслоение кривых, описывающих зависимость $D=f(\Delta T)$ для разных типов имитатора, причем кривые идут почти эквидистантно.

Установлено, что полоса пропускания усилителя существенно влияет на характеристики тарировочной кривой $D=f(\Delta T)$. Вид функции $D=f(\Delta T)$ при использовании узкополосного усилителя ($\Delta f = 10$ кГц при $f_p = 100$ кГц) не совпадает с функцией $D=f(\Delta T)$ при использовании широкополосного усили-

теля. В частности, соответственные диапазоны изменения интервала времени существенно различаются: 38...227 мкс и 132...933 мкс.

В заводских условиях непосредственно во время работы аммиачной холодильной установки были проведены эксперименты на трубопроводах газообразного аммиака $\varnothing 219 \times 8$ мм протяженностью 24 м и $\varnothing 70 \times 4$ мм протяженностью 33 м, а также жидкого аммиака $\varnothing 70 \times 4$ мм протяженностью 30 м, изготовленных из стали 10 и находившихся в эксплуатации более 20 лет.

Для трубопровода $\varnothing 219 \times 8$ мм диапазон изменения интервала времени ΔT на расстоянии $D = 24$ м составил $\Delta T = 120 \dots 19650$ мкс, приведенная относительная ошибка $\delta(\Delta T)_{прив}$ составляет по модулю не более 12%, причем на расстояниях до 15 м – не более 4%. Максимальная ошибка δD соответствует расстоянию $D = 18$ м. Среднеквадратичное отклонения от средних величин расстояний имеют максимальную значение при расстоянии $D = 12$ м и составляет $\sigma_D = 2,5$ м. На рис. 5 представлен график $D = f(\Delta T)$ без использования и с использованием поправочных коэффициентов.

При использовании на трубопроводе $\varnothing 219 \times 8$ мм узкополосного усилителя диапазон изменения интервала времени на расстоянии $D = 1,5 \dots 12$ м составил $\Delta T = 0,22 \dots 0,94$ мс, что не совпадает с аналогичным диапазоном при использовании широкополосного усилителя.

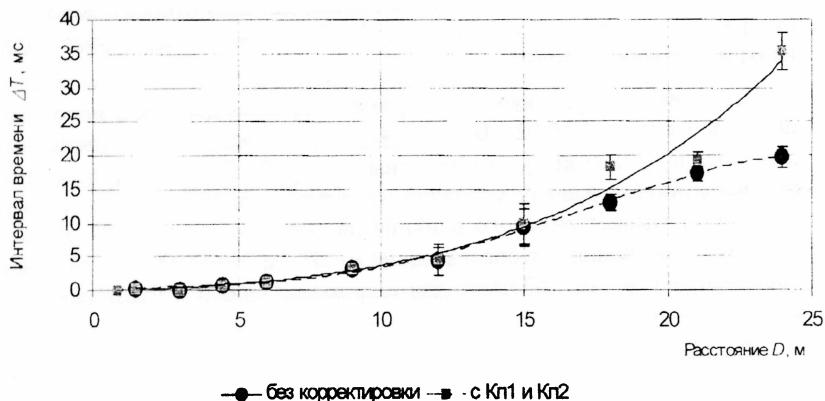


Рис. 5 Зависимость временного интервала ΔT от расстояния D для трубопровода $\varnothing 219 \times 8$ мм

Результаты экспериментов, выполненных на трубопроводах $\varnothing 70 \times 4$ мм показали, что диапазон изменения интервала времени для расстояния $D = 1,5 \dots 30$ м лежит в диапазоне от 160 мкс до 8900 мкс для трубопровода газо-

образного аммиака и 440 мкс до 10300 мкс для трубопровода жидкого аммиака, т.о. было установлено, что различие свойств среды, находящейся внутри трубопровода, оказывает влияние на тарировочную зависимость $D=f(\Delta T)$. Диапазон изменения значений абсолютных ошибок определения расстояния δD для трубопроводов жидкого и газообразного аммиака $\varnothing 70 \times 4$ мм составил от 0,2 м до 2,7 м и от 0,5 м до 4,8 м соответственно. Диапазон приведенных значений относительных ошибок оценки расстояния $(\delta D)_{прив}$ составил от 0,6% до 9% для трубопровода жидкого аммиака и от 1,5% до 14,6% для трубопровода газообразного аммиака.

В четвертой главе приведена методика оценки вероятности совершения ошибки при определении класса опасности развивающихся дефектов в стенке трубопровода на примере использования интегрально-динамического критерия. Вероятность нахождения ошибки определяется на основе оценки вероятности ошибки в оценке ранга R опасности дефекта.

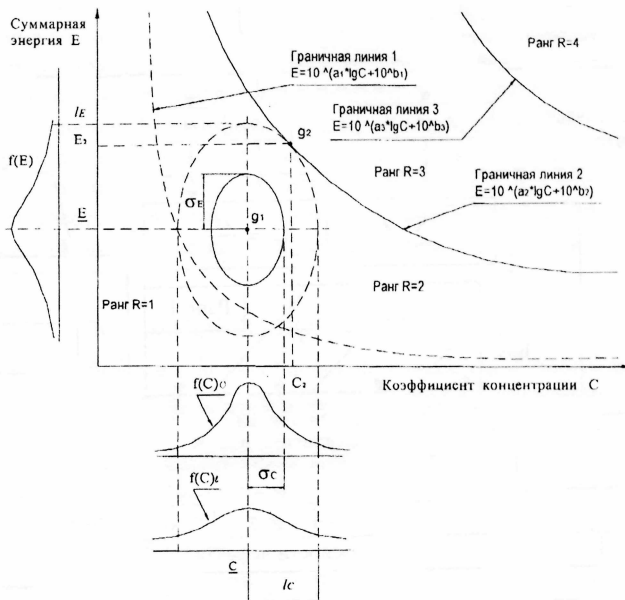


Рис. 6 Двумерное диагностическое пространство параметров E и C, используемое для определения ранга R

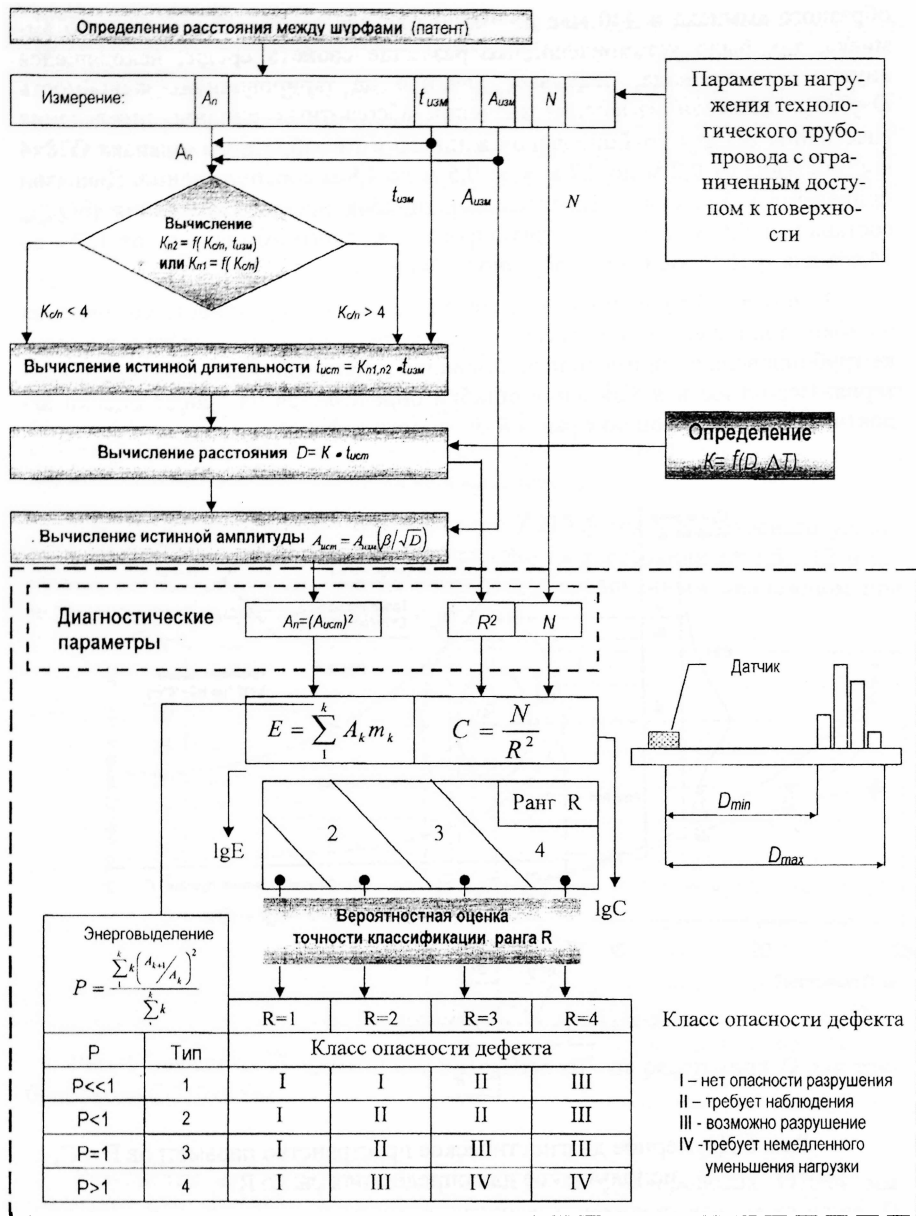


Рис. 7 Алгоритм методики АЭ диагностирования подземных технологических трубопроводов

Для этого в соответствии с процедурой интегрально-динамического критерия определяется коэффициент концентрации C , суммарная энергия E и их среднеквадратичные отклонения σ_C и σ_E . Строится эллипс равной плотности вероятности для доверительного интервала, равного 1σ (рис. 6). Затем размеры эллипса симметрично изменяются на величину коэффициента λ до касания с граничной линией, разделяющей различные ранги опасности дефектов. Итерационным способом определяется величина λ . Используя функцию Лапласа Φ , с учетом симметричности кривой плотности нормального распределения относительно средних значений $\bar{E}$ и $\bar{C}$, вероятность ошибки классификации источника АЭ в k -ой зоне на j -ом этапе нагружения можно представить зависимостью $P_{jk} = 1 - 2\Phi(\lambda)_{jk}$.

Предложенный алгоритм позволяет оценить достоверность оценки класса опасности развивающихся дефектов в сварной конструкции с использованием статистических характеристик.

Разработана методика акустико-эмиссионного диагностирования подземных технологических трубопроводов на основе использования интегрально-динамического критерия оценки степени опасности источников АЭ, блок-схема которой приведена на рис. 7.

Данная методика позволяет выявлять и проводить оценку степени опасности дефектов в случаях ограниченного или одностороннего доступа к поверхности трубопроводов, сократить количество зон доступа к поверхности сварной конструкции и количество используемых каналов АЭ аппаратуры за счет увеличения расстояния между местами установки ПАЭ, оценить достоверность определения класса опасности развивающихся дефектов.

ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ И РЕЗУЛЬТАТЫ

1. Обоснован выбор метода акустической эмиссии в качестве средства, позволяющего выявить и оценить степень опасности развивающихся дефектов в технологических трубопроводах с ограниченным или односторонним доступом к поверхности.

2. Разработан и апробирован способ оценки расстояния до развивающегося дефекта при использовании только одного датчика. На данный способ был получен патент на изобретение.

3. Предложен метод «половинного деления», для определения времени нарастания растянутых импульсов АЭ с отношением сигнал/порог $K_{с/п} < 4$, что дает возможность избавиться от появления случайных выбросов в сигнале.

4. Разработан алгоритм корректировки измеряемых АЭ аппаратурой временных параметров импульсов АЭ при аппроксимации формы импульса дельта-функцией и дугой окружности со смещенным центром, позволяющий рассчитать численные значения поправочных коэффициентов K_{n1} и K_{n2} из

меренному времени нарастания сигнала.

5. Получены зависимости, связывающие приведенную относительную ошибку определения истинной амплитуды сигнала с расстоянием до источника АЭ, с величиной коэффициента затухания сигналов АЭ в материале и относительной погрешностью определения расстояния и позволяющие оценить точность определения амплитуды сигнала.

6. Предложен алгоритм нахождения вероятности совершения ошибки при определении класса опасности развивающихся дефектов на базе интегрально-динамического критерия, который нашел применение в НТЦ «Нефтегаздиагностика» при обработке полученных данных в результате АЭ-диагностирования магистральных трубопроводов.

7. Разработана методика акустико-эмиссионного диагностирования подземных технологических трубопроводов на основе осуществления локации источников АЭ с помощью только одного датчика и определения вероятности ошибки при классификации дефектов, которая прошла апробацию и получила внедрение в ЦТД «Кодиак».

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ ОПУБЛИКОВАНО В РАБОТАХ

1. Игнатов В.В. Алгоритм определения времени распространения составляющих АЭ-сигнала в толстостенном трубопроводе для повышения достоверности контроля // Нефть и газ – 2001 : Тез. докл. на 55-ой Юбилейной Межвузовской студенческой научной конференции.- М., 2001.- С. 49.

2. Пат. 2229121 Российская Федерация МПК⁷ G 01 N 29/14. Способ определения расстояния между преобразователем и источником акустической эмиссии / Игнатов В.В., Игнатов В.Н. // Б.И.- 2004.- № 14.

3. Игнатов В.В., Игнатов В.Н., Зорин Е.Е. Об определении расстояния до источников акустической эмиссии с помощью одного преобразователя // Безопасность труда в промышленности.- 2003.- №8.- С. 33-35.

4. Игнатов В.В., Игнатов В.Н., Зорин Е.Е. Методика количественной оценки точности классификации источников акустической эмиссии // Безопасность труда в промышленности.- 2004.- №10.- С. 51-54.