

На правах рукописи



Измайлова Евгения Вячеславовна

**ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНАЯ СИСТЕМА И
МЕТОД КОНТРОЛЯ ТРУБОПРОВОДОВ НА ОСНОВЕ
ВЕЙВЛЕТ ФИЛЬТРАЦИИ СИГНАЛОВ АКУСТИЧЕСКОЙ
ЭМИССИИ**

05.11.13. – Приборы и методы контроля природной
среды, веществ, материалов и изделий

Автореферат
диссертации на соискание ученой
степени кандидата технических наук

Казань – 2013

Работа выполнена в ФГБОУ ВПО «Казанский государственный энергетический университет», на кафедре «Промышленная теплоэнергетика и системы теплоснабжения»

Научный руководитель: Ваньков Юрий Витальевич
доктор технических наук, профессор,
ФГБОУ ВПО «Казанский государственный энергетический университет», заведующий кафедрой «Промышленная теплоэнергетика и системы теплоснабжения»

Официальные оппоненты: Ившин Игорь Владимирович
доктор технических наук, профессор,
ФГБОУ ВПО «Казанский государственный энергетический университет», заведующий кафедрой «Электроснабжение промышленных предприятий»

Мисевич Павел Валерьевич
доктор технических наук, доцент,
ФГБОУ ВПО «Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева», профессор кафедры «Вычислительные системы и технологии»

Ведущая организация: ОАО «ВНИПИэнергопром», г. Москва

Защита состоится 13 декабря 2013 г. в 16 часов 00 минут на заседании диссертационного совета Д 212.082.01 при ФГБОУ ВПО «Казанский государственный энергетический университет» (420066, г. Казань, ул. Красносельская, 51, тел./факс 8(843)519-42-55.

Отзывы на автореферат в двух экземплярах, заверенных печатью учреждения, просим направлять по адресу: 420066, г. Казань, ул. Красносельская, 51, КГЭУ, Ученому секретарю диссертационного совета Д 212.082.01.

С диссертацией можно ознакомиться в научной библиотеке Казанского государственного энергетического университета, с авторефератом – на сайтах <http://vak.ed.gov.ru> и <http://www.kgeu.ru>

Автореферат разослан «09» ноября 2013 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета, д.ф.-м.н.



Калимуллин Рустем Ирекович

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. Согласно Энергетической стратегии России на период до 2020 года, приоритетными направлениями развития энергетики и теплоснабжения являются снижение удельных затрат топлива при производстве и потреблении энергоресурсов за счет применения энергосберегающих технологий и оборудования, увеличение надежности теплоснабжения, а также сокращение тепловых потерь при транспортировке теплоносителя.

В ряде населенных пунктов до 60% тепловой энергии, вырабатываемой из первичных энергоносителей, теряется на пути следования к потребителю. Потери происходят из-за разных факторов, в число которых входят два основных типа повреждений, приводящих в конечном итоге к разрушению трубопровода – трещиноподобные дефекты и дефекты коррозионной природы. В этой связи необходим контроль состояния трубопроводов. Внедрение систем контроля тепловых сетей сдерживается отсутствием методик контроля, учитывающих конструктивно-технологические и эксплуатационные особенности объектов контроля, несовершенством аппаратуры для работы в производственных условиях, а также отсутствием достоверных данных об информативных параметрах, отражающих тип дефекта и их связи с критериями разрушения. При проведении контроля трубопроводных систем необходимо применение методов неразрушающего контроля (НК), позволяющих осуществлять обнаружение дефектов, возникающих в процессе эксплуатации по всей длине диагностируемого участка. Среди интегральных способов контроля широкое применение в промышленности получил метод акустической эмиссии (АЭ), в частности, при диагностике состояния энергетических агрегатов. Основой метода АЭ является акустическое излучение при пластической деформации твердых сред, трений, прохождении жидких и газообразных сред через узкие отверстия – сквозные дефекты. Эти процессы порождают волны, регистрируя которые, можно судить о протекании процессов и их параметрах. Он позволяет не только обнаруживать наиболее опасные дефекты, развивающиеся в контролируемом объекте, но и оценивать степень их опасности, продлевать эксплуатационный цикл ответственных промышленных объектов, прогнозировать вероятность возникновения аварийных разрушений. Однако метод АЭ обладает и недостатками, основным из которых является низкая помехоустойчивость. В диссертационной работе решается задача развития метода акустической эмиссии применительно к контролю трубопроводов на фоне шумов.

Объект исследования – сигналы акустической эмиссии на фоне шумов от работающего оборудования.

Предмет исследования – акустико-эмиссионный метод контроля состояния трубопроводов.

Цель исследования – разработка метода и информационно-измерительной системы контроля состояния трубопроводов методом акустической эмиссии на основе вейвлет фильтрации.

В соответствии с целью исследования были поставлены следующие задачи.

1. Обосновать эффективность вейвлет преобразования для очистки от помех эталонного сигнала акустической эмиссии. Определить тип вейвлетов, эффективно выделяющий полезный сигнал на фоне помех при сравнимых уровнях сигнала и шума.

2. Исследовать применимость PSNR (peak signal-to-noise ratio) метрики для обработки затухающих акустических сигналов.

3. Разработать алгоритм и методику, позволяющую обнаруживать дефекты трубопроводов по анализу сигналов акустической эмиссии.

4. Разработать опытную установку и провести экспериментальные исследования трубопроводов при разных уровнях шумов.

5. На основе теоретических и экспериментальных исследований разработать методику контроля трубопроводов методом акустической эмиссии на основе вейвлет фильтрации.

Методы исследования. Теоретическая часть основывается на методах подавления и фильтрации шумов вейвлет преобразованием, развитых в работах Daubechies I., Kaiser G., Pen U., Van den Berg J.C., Галягина Д., Фрика П.Г., Дремина И.М., Новикова Л.В., Воробьева В.И., Грибунина В.Г., Петухова А.П., Шитова А.Б., Щукина Е.Л., Штарка Г.Г., Яковлева А.Н., Акутина М.В. Экспериментальная часть выполнена с применением цифровой обработки сигналов, технологии «Виртуальных приборов» среды графического программирования LabVIEW фирмы National Instrument, и «Signal.ru», предоставившей драйвера, основана на работах Суранова А.Я., Батоврина В.К., Бессонова А.С., Мошкина В.В., Папуловского В.Ф., Бутырина П.А., Васьковской Т.А., Каратаева В.В., Материкина С.В., Тревиса Д., Сато Ю., Иванова В.И., Бигуса Г.А., Власова И.Э. Разработанный метод контроля может использоваться в системе мониторинга тепловых сетей на основе геоинформационных технологий, развиваемых авторами James Corbett, Donald Cooke, Maxfield, Howard Fisher, Dana Tomlin, William Garrison, Torsten Hagerstrand, Harold McCarty, Ian McNarg, Ашировым А.А., Озеровым Д.А. (ООО «Политерм»), Ексаевым А.Р. (ИВЦ «Поток»).

Научная новизна заключается в следующем:

1. Обоснована эффективность вейвлет преобразования для фильтрации акустического сигнала от шумов при использовании источника Су-Нильсена (излома графитового стержня, имитирующего АЭ сигналы).

2. Установлена работоспособность PSNR метрики при контроле изделий по анализу затухающих акустических сигналов, позволяющей рассматривать изменения в отдельных частотных диапазонах и не зависящей от фазы сигнала.

3. Проанализированы сорок типов вейвлет-базиса и определен тип вейвлета Mexican Hat как эффективно выделяющий эталонный сигнал АЭ на фоне помех при сравнимых уровнях сигнала и шума.

4. Разработан новый метод контроля состояния трубопроводов на основе вейвлет фильтрации сигналов акустической эмиссии.

На защиту выносятся

1. Результаты исследований влияния шума на обнаружение сигнала акустической эмиссии от шумов при использовании источника Су-Нильсена.

2. Результаты исследований обнаружения дефектов в изделиях PSNR метрикой по анализу затухающих акустических сигналов.

3. Методика обработки сигналов на основе вейвлет разложения, позволяющая обнаруживать сигнал АЭ, уровень которых близок к уровню шумов.

4. Разработанная установка и результаты экспериментальных исследований по обнаружению сигналов акустической эмиссии на фоне шума.

5. Метод контроля дефектов трубопроводов, типа трещина, по анализу сигналов акустической эмиссии на основе вейвлет фильтрации.

Достоверность полученных результатов и обоснованность выводов обеспечиваются использованием современных теоретических и экспериментальных методов исследования, аттестованных контрольно-измерительных приборов и корректным применением программных продуктов, совпадением теоретических результатов с полученными экспериментальными данными, сопоставимостью результатов с данными, полученными другими исследователями.

Практическая значимость

Разработанные метод и устройство позволяют обнаруживать сигналы акустической эмиссии на фоне шумов. Разработанная программа и результаты диссертационного исследования могут быть использованы при разработке методик контроля опасных производственных объектов и всех видов трубопроводных сетей.

Реализация результатов работы. Алгоритмы обработки акустических сигналов использованы в ООО «Алтек-наука» (г. Санкт-Петербург) при разработке измерительно-диагностического комплекса, филиале ООО «КЭР-Инжиниринг» «ТатНИПИэнергопром» (г. Казань) и институте «ТатНИПИнефть» (г. Бугульма) при разработке методики контроля трубопроводов, что подтверждено соответствующими актами.

Апробация работы. Результаты работы докладывались и обсуждались на следующих конференциях, семинарах и симпозиумах:

XIV-XVI Аспирантско-магистерских семинарах, КГЭУ, г. Казань, 2010-2012 г.г.; XI-XII Международных симпозиумах «Энергоресурсоэффективность и энергосбережение», ГАУ «Центр энергосберегающих технологий РТ при Кабинете Министров РТ», г. Казань, 2010-2011 г.г.; Международной научно-технической конференции «Состояние и перспективы развития электротехнологии» (XVI Бенардосовские чтения), ИГЭУ, г. Иваново, 2011 г.; VI-VIII Всероссийских научных студенческих конференциях по естественно-научным и техническим дисциплинам «Научному прогрессу – творчество молодым», ПГТУ, г. Йошкар-Ола, 2011-2013 г.г.; VI-VIII Молодежных международных научных конференциях «Тинчуринские чтения», КГЭУ, г. Казань, 2011-2013 г.г.; Всероссийской межвузовской научно-технической конференции «Электромеханические и внутрикамерные процессы в энергетических установках, струйная акустика и диагностика, приборы и методы контроля природной среды, веществ, материалов и изделий», КВАКУ, г. Казань, 16-18 мая 2011 г.; VII-VIII Региональных научно-технических конференциях (с

международным участием) «ЭНЕРГИЯ», ИГЭУ, г. Иваново, 2012-2013 г.г.; Международной научно-практической конференции «Измерения: Состояние, перспективы развития», ЮУрГУ, г. Челябинск, 2012 г.; XIX Международной научно-технической конференции «Радиоэлектроника, электротехника и энергетика», МЭИ, г. Москва, 2013 г.; XIX Международной научно-практической конференции студентов и молодых ученых «Современные техника и технологии» СТТ-2013, ТПУ, г. Томск, 2013 г.; Всероссийском круглом столе «Молодежные идеи и проекты, направленные на повышение энергоэффективности и энергосбережение» (IV Ярославский энергетический форум), ЯГТУ, г. Ярославль, 2013 г.

Диссертационная работа выполнялась при поддержке стипендии Гранта Президента РФ молодым ученым и аспирантам, осуществляющим перспективные научные исследования и разработки по приоритетным направлениям российской экономики на 2012-2014 г.г. (грант СП-2137.2012.1).

Публикации.

По теме диссертации опубликована 21 печатная работа, из них 3 статьи в журналах, входящих в перечень ВАК РФ, 2 патента на полезную модель, 2 свидетельства о государственной регистрации программы для ЭВМ.

Личный вклад автора.

Автор принимал непосредственное участие в разработке методики обработки зашумленных сигналов, разработке и создании экспериментального стенда и устройства для контроля трубопроводов, в написании программного обеспечения для регистрации, обработки и анализа данных, проводил все измерения, первичную и статистическую обработку и анализ экспериментальных данных.

Соответствие диссертации научной специальности.

Диссертация соответствует специальности 05.11.13 «Приборы и методы контроля природной среды, веществ, материалов и изделий» и относится к следующим областям исследования:

1. Разработанный метод контроля технического состояния трубопроводов по анализу сигналов акустической эмиссии на основе вейвлет-фильтрации соответствует п. 1 «Научное обоснование новых и усовершенствование существующих методов аналитического и неразрушающего контроля природной среды, веществ, материалов и изделий».

2. Разработка и создание устройства для акустико-эмиссионного контроля тепловых сетей соответствует п.3 «Разработка, внедрение и испытания приборов, средств и систем контроля природной среды, веществ, материалов и изделий, имеющих лучшие характеристики по сравнению с прототипами».

3. Разработка программ сбора и обработки сигналов акустической эмиссии соответствует п.6. «Разработка алгоритмического и программно-технического обеспечения процессов обработки информативных сигналов и представление результатов в приборах и средствах контроля, автоматизация приборов контроля».

Структура и объем работы. Диссертационная работа состоит из введения, пяти глав, заключения, списка используемой литературы, включающей 106 наименования. Работа изложена на 160 страницах и содержит 55 рисунков, 8 таблиц и 7 приложений.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы диссертационной работы, приведена общая характеристика работы, ее практическая значимость, научная новизна и основные положения, выносимые на защиту.

В первой главе выполнен литературный обзор и оценено состояние проблемы контроля трубопроводов на данный момент. Показано, что проблемы энергоэффективности при передаче тепловой энергии связаны с контролем состояния тепловых сетей.

Проведен анализ методов неразрушающего контроля (НК), используемых для диагностирования трубопроводов. Установлено, что для решения задач по обнаружению дефектов трубопроводов необходимо использовать интегральные методы, позволяющие контролировать протяженные участки сетей. Одним из них является метод акустической эмиссии (АЭ), обладающий определенными преимуществами по сравнению с традиционными методами НК. Проанализированы недостатки метода АЭ, наиболее существенным из которых, является сильная зависимость результатов контроля от внешних шумов. В выводах главы сформулированы цель и задачи исследования.

Во второй главе рассмотрены особенности и информативные критерии наличия и роста дефектов при проведении акустико-эмиссионного контроля, реализованные в программе FlawDefiner, разработанной автором в среде графического программирования LabVIEW 9.0.

Акустическая эмиссия материала возникает из-за локальной динамической перестройки его структуры. Рост трещины в объектах, изготовленных из конструкционных сталей и сплавов, происходит, как правило, вязким образом и подчиняется закономерности:

$$N = cK^m, \quad (1)$$

где N – суммарный счет АЭ при развитии трещины; c – коэффициент пропорциональности, зависящий от свойств материала; K – коэффициент интенсивности напряжений (КИН), зависящий от свойств материала объекта, его геометрии, размера, формы и положения трещины; m – параметр, зависящий от материала, его состояния, условий роста трещины.

На рис. 1 показана часть блок-диаграммы программы, где реализуются суммарный счет АЭ и определение координат источника АЭ по разнице во времени прохождения (РВП) сигнала от одного источника до разнесенных в пространстве датчиков АЭ.

При оценке технического состояния объекта по параметрам АЭ стоит задача классификации источников АЭ. В процессе контроля проводят накопление и обработку данных. После обработки принятых сигналов

результаты контроля представляют в виде идентифицированных и классифицированных источников АЭ.

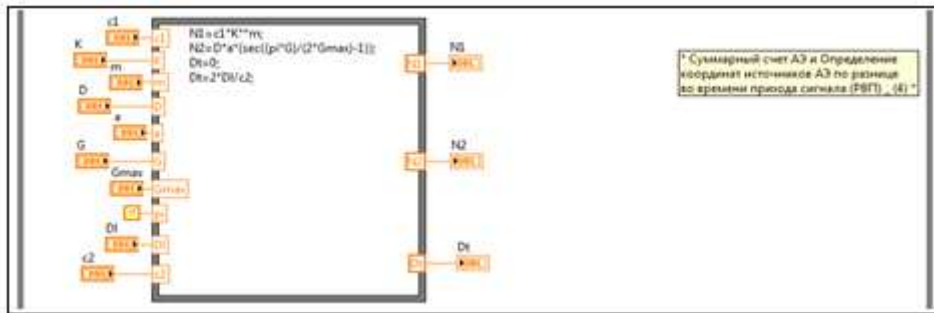


Рис.1. Часть блок-диаграммы программы, реализующей суммарный счет импульсов АЭ и определение координат источника АЭ

Так как АЭ представляет собой импульсный случайный процесс, аппаратура АЭ должна обеспечивать выделение параметров этого процесса с тем, чтобы можно было оценить техническое состояние контролируемого объекта. Динамический диапазон сигналов АЭ при выполнении контроля достигает 100 дБ и более. Наиболее распространенным диапазоном частот при АЭ контроле компактных объектов (например, сосудов) является диапазон 100...200 кГц, а для контроля трубопроводов диапазон 10...60 кГц.

Для регистрации и обработки сигналов акустической эмиссии автором разработана программа ImCounter в среде программирования LabVIEW 11.0. Программа обеспечивает выполнение следующих функций: подключение к АЦП и запись сигнала; чтение записанных данных и их графическое воспроизведение; определение максимального и минимального значения сигнала; определение счета импульсов. На рис. 2 и 3 представлены части блок-диаграммы программы регистрации и обработки сигналов.

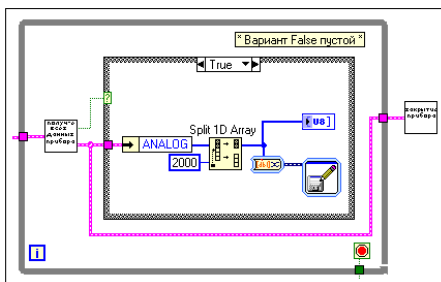


Рис.2. Часть блок-диаграммы программы, регистрирующей и записывающей сигнал

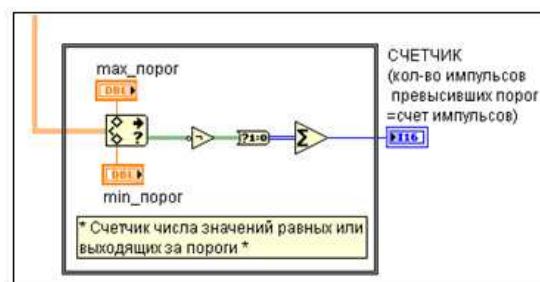


Рис.3. Часть блок-диаграммы программы, определяющей количество импульсов

Основным фактором, ограничивающим эффективность АЭ контроля, являются шумы. Шумы подразделяются в зависимости от источника происхождения на акустические (механические) и электромагнитные; от вида сигнала на импульсные и непрерывные; от места положения источника на внешние и внутренние. К источникам акустических шумов относятся работа насосов, моторов и других механических устройств, потоки жидкости; процессы трения, например, трение конструкций в местах опор; процессы, связанные с ударными возмущениями. К источникам электрических и

электромагнитных шумов можно отнести земляные контуры, включенные силовые цепи, радио и навигационные передатчики.

Согласно правил организации и проведения акустико-эмиссионного контроля сосудов, аппаратов, котлов и технологических трубопроводов ПБ 03-593-03 уровень непрерывных акустических или электромагнитных шумов ($U_{ш}$) не должен превышать $U_{ша} + 6$ дБ ($U_{ш} < U_{пор} = U_{ша} + 6$ дБ). Здесь $U_{пор}$ – пороговое напряжение. Ограничения по импульсным шумам (помехам) устанавливаются исходя из условий, при которых проводят испытания. Рекомендуются, чтобы средняя частота регистрации импульсных помех не превышала 0,01 Гц (т.е. $f_{пом} < 0,01$ Гц). Проведение контроля в условиях повышенной частоты регистрации импульсных помех (т.е. при выполнении неравенства $f_{пом} > 0,01$) возможно при научно-техническом обосновании возможности выявления требуемых источников АЭ.

Для выделения полезных сигналов может использоваться технология плавающего порога, являющаяся эффективной при условии, что не происходит существенной потери АЭ данных. Сигналы АЭ, уровень которых близок к уровню шумов, такими методами выделить невозможно.

В связи с тем, что источники шумов по характеристикам формы сигналов отличаются от эмиссии, связанной с дефектами, их отделяют путем использования математических методов дискриминации на компьютере, в частности фильтрации.

Частотная фильтрация основана на различии частотного спектра сигналов АЭ и помех. Метод частотной фильтрации наилучшие результаты дает при выделении сигнала АЭ из механических шумов.

Известны методы выборочного отбора и записи данных, базирующиеся на факторах времени, нагрузки или местоположения в пространстве. Такую машинную обработку можно проводить и после измерения, и во время процесса отображения информации (графического фильтрования), и уже после испытаний в процессе послетестовой обработки, используя программы послетестовой фильтрации.

В последние годы для исследования характеристик сигналов стала применяться технология вейвлет анализа. Особенности ее использования для выделения сигналов акустической эмиссии на фоне шумов рассмотрены в третьей главе.

В третьей главе проанализированы достижения других авторов в области вейвлет фильтрации сигналов и проведены исследования использования вейвлетов с разными характеристиками для фильтрации от шумов сигналов акустической эмиссии. Процессы типа ударов, трения, течей, шума уличного транспорта, работающего технологического оборудования являются источниками нежелательных шумов, часто превышающих уровень от сигнала АЭ при развитии трещины.

В отличие от традиционно применяемого при анализе данных преобразования Фурье, результаты, полученные с помощью вейвлет анализа, обладают большей информативностью и способны непосредственно улавливать такие особенности данных, которые при традиционном подходе

анализировать затруднительно. Исследована возможность применения PSNR метрики для контроля изделий по анализу затухающих сигналов. Аббревиатура PSNR является термином, означающим соотношение между максимумом возможного значения сигнала и мощностью шума, искажающего значения сигнала, рассчитывается по формуле:

$$PSNR = 20 \times \text{Log} \left(\frac{Max_value}{\sqrt{\frac{\sum_{i=0}^{\min(b^s, b)} \sum_{j=f_1}^{f_2} (C_i^s[j] - C_i[j])^2}{\min(b^s, b)}}} \right), \quad (2)$$

где Max_value – амплитуда сигнала максимально возможной мощности, допустимая в данном представлении звукового сигнала; $C_i^s[j]$ и $C_i[j]$ – значения амплитуд скейлограмм эталонного и исследуемого сигнала; b^s и b – количество сдвигов вейвлет базиса для первого и второго сигнала соответственно; f_1 и f_2 – параметры, выделяющие из общей скейлограммы частотную полосу для исследования. Обоснована применимость PSNR метрики при контроле изделий по анализу затухающих акустических сигналов, позволяющей рассматривать изменения в отдельных частотных диапазонах и не зависящей от фазы сигнала.

В работе исследовали сорок типов вейвлет-базиса с разными характеристиками (табл. 1.).

Табл. 1.

Мнемоническое обозначение	Название вейвлета	Характеристика соответствующего вейвлета
Meyer	Мейера	С бесконечной гладкостью
Morlet	Марлета	Вейвлет с бесконечным носителем
Mexican Hat	Мексиканская шляпа	
Haar	Хаара	Ортогональные вейвлеты с конечной маской
Db №	Добеши	
Sym №	Симлеты	
Coif №	Койфлеты	
Bior №	Биортогональные	Биортогональные вейвлеты с конечной маской

Модель зашумленного сигнала принималась аддитивной:

$$s(n) = f(n) + k \cdot e(n) \quad (3)$$

с равномерным шагом по аргументу n , где $f(n)$ – полезная информационная составляющая; $e(n)$ – шумовой сигнал, например, белый шум определенного уровня со средним нулевым значением.

Процедура удаления шума выполнялась с использованием вейвлетов и включала следующие операции:

- *Вейвлет разложение сигнала $s(n)$* . Значение уровня разложения определяется частотным спектром информационной части $f(n)$ сигнала. Тип и порядок вейвлета влияет на качество очистки сигнала от шума в зависимости от формы сигналов $f(n)$.

- *Задание типа и пороговых уровней очистки* по данным о характере шумов. Пороговые уровни очистки могут быть гибкими (в зависимости от номера уровня разложения) или жесткими (глобальными).

- *Модификация коэффициентов детализации* вейвлет разложения в соответствии с установленными условиями очистки.

- *Восстановление полезного сигнала* на основе коэффициентов аппроксимации и модифицированных детализационных коэффициентов.

Выбор вейвлета и глубины разложения зависят от свойств сигнала. Более гладкие вейвлеты создают более гладкую аппроксимацию сигнала, и наоборот – «короткие» вейвлеты лучше отслеживают пики аппроксимируемой функции.

Для исследования вейвлет фильтрации сигналов, полученных при использовании метода АЭ, был создан лабораторный стенд, на который был получен патент на полезную модель, проведены эксперименты, результаты которых изложены в четвертой главе.

Четвертая глава посвящена экспериментальным исследованиям. Работы проводились на лабораторном стенде для исследования трубопроводов с циркулирующей жидкостью и возможностью повышения давления на исследуемом участке до 0,4 МПа (рис. 4).

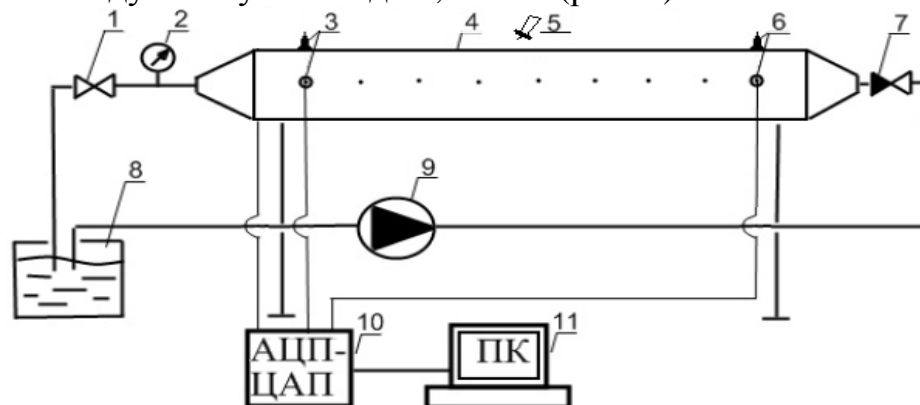


Рис. 4. Экспериментальный стенд для исследования участка трубопровода: 1 – вентиль; 2 – манометр; 3, 6 – датчики акустической эмиссии, 4 – трубопровод; 5 – источник Су-Нильсена; 7 – обратный клапан; 8 – емкость; 9 – насос; 10 – АЦП-ЦАП; 11 – персональный компьютер.



Рис. 5. Фотографии стенда и его элементов

Оценка погрешности результатов измерений на стенде проводилась вероятностно-статистическим методом, согласно ГОСТ 8.207-76. Оценка результатов измерений проводилась путем получения среднего арифметического 30 наблюдений амплитуды сигнала акустической эмиссии:

$$\tilde{A} = \frac{\sum_{i=1}^n A_i}{n}. \quad (4)$$

Установлено, что с учетом полученных значений для измерительного комплекса $\Delta A = \pm 0,1286$ В, при доверительной вероятности $P = 0,95$ при результатах измерений $\tilde{A} = 0,4633$ В.

Характерные сигналы, от эталонного источника акустической эмиссии, записанные в ходе экспериментов с незаполненным, заполненным участком трубопровода и с циркулирующей по трубопроводу при разных давлениях жидкостью приведены на рис. 6-9.

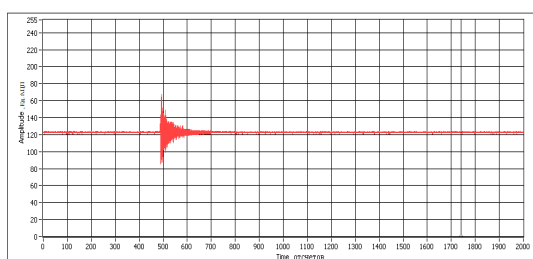


Рис. 6. Сигнал при незаполненной трубе

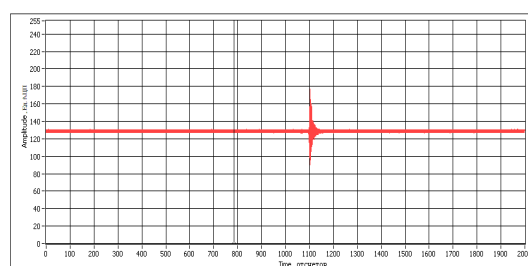


Рис. 7. Сигнал в трубе с водой

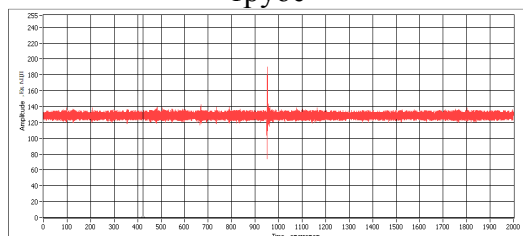


Рис. 8. Сигнал в трубе с водой с работающим насосом ($P_{изб}=0,01$ МПа)

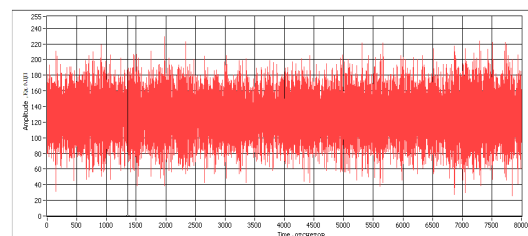


Рис. 9. Сигнал в трубе с водой с работающим насосом ($P_{изб}=0,25$ МПа)

Первую серию измерений проводили на незаполненной трубе с выключенным насосом, имитировали сигнал АЭ (проскок трещины от источника Су-Нильсена), записывали его и обрабатывали. Сигнал отчетливо просматривался (рис. 6). Во второй серии измерений заполнили трубу водой и повторили действия – сигнал хорошо просматривался, но часть энергии сигнала рассеялась в воде (рис. 7). Третья серия измерений проводилась при циркуляции жидкости по контуру. Исследования проводили при шести разных давлениях в трубе (0,01; 0,05; 0,1; 0,15; 0,2; 0,25 МПа). По мере увеличения давления в контуре изменялось соотношение «полезный сигнал-шум». При давлении $P_{изб} = 0,01$ МПа сигнал просматривается на фоне шума от работающего насоса (рис. 8), а при давлении $P_{изб} = 0,25$ МПа уровень шума был сравним с уровнем сигнала, поэтому сигнал АЭ визуально не определяется (рис. 9).

Результат обработки вейвлет фильтрацией зашумленного сигнала (типа приведенного на рис. 9) представлен на рис. 10. Сигнал обработан программой WaveDenoise, разработанной автором в среде программирования LabVIEW 9.0.

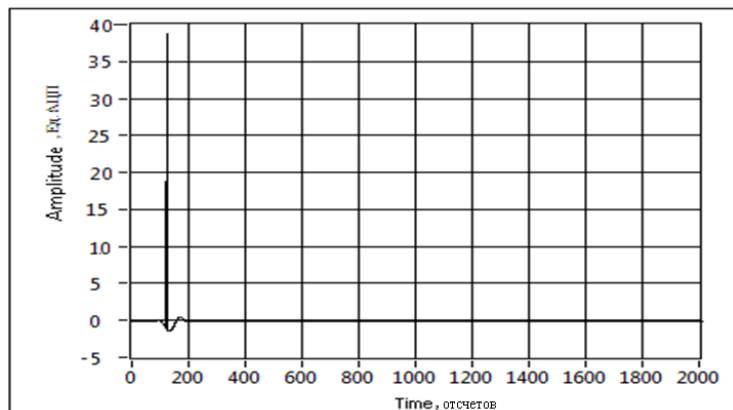


Рис. 10. Обработанный вейвлет фильтрацией (типом Mexican Hat) сигнал от излома грифеля о поверхность заполненной трубы с работающим насосом

По результатам исследований была создана установка для мониторинга состояния трубопроводов натуральных объектов (рис. 11), на которую был получен патент на полезную модель.

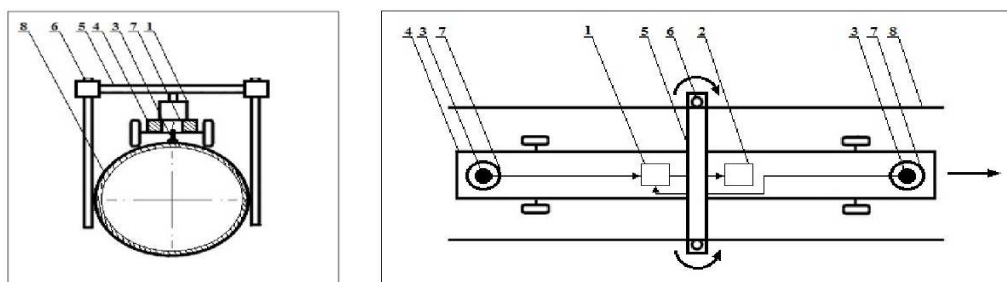


Рис. 11. Принципиальная схема установки для мониторинга состояния трубопроводов: 1 – аналого-цифровой преобразователь; 2 – персональный компьютер; 3 – два пьезоэлектрических датчика; 4 – тележка; 5 – планка; 6 – прорезиненные стержни; 7 – отверстия; 8 – трубопровод

В пятой главе рассмотрены вопросы, связанные с применением результатов исследований.

Предложено создать модель мониторинга системы теплоснабжения работающей в режиме реального времени на базе геоинформационной системы, так как решение задач диагностики трубопроводов без учета «географической» привязки сетей к плану территории неэффективно.

Описывается понятие «электронная модель» систем теплоснабжения. Перечислены возможности геоинформационной системы

Показана возможность создания на основе разработанного метода аппаратно-программного комплекса для обнаружения утечек теплоносителя и контроля состояния трубопроводов на основе геоинформационной системы ZULU, работающего в режиме реального времени (рис. 12).

Предложенная информационно-измерительная система мониторинга состояния тепловых сможет функционировать совместно с электронными

картами систем теплоснабжения населенных пунктов, разрабатываемыми в настоящее время в соответствии с требованиями Федерального закона № 190 от 27.07.2010 г. «О теплоснабжении».



Рис. 12. Электронная модель системы теплоснабжения

Результатом работы аппаратно-программного комплекса будет являться вывод на экран монитора диспетчера системы тепловых сетей, информации о наличии на контролируемом участке трубопровода дефекта, его размере и местоположении.

В заключении сформулированы выводы по диссертационной работе.

В приложении диссертации приведены патенты на полезные модели, свидетельства о государственной регистрации программ для ЭВМ и акты реализации результатов диссертации.

ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ И РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

1. Обоснована эффективность вейвлет преобразования для очистки от помех эталонного сигнала акустической эмиссии. Определен тип вейвлета Mexican Hat как эффективно выделяющий эталонный сигнал АЭ на фоне помех при сравнимых уровнях сигнала и шума.

2. Обоснована работоспособность PSNR метрики при акустическом контроле изделий по анализу затухающих акустических сигналов.

3. Разработан алгоритм обнаружения и идентификации дефектов по параметрам акустической эмиссии на фоне шума.

4. Разработана методика на основе вейвлет разложения, позволяющая обнаруживать дефекты трубопроводов по анализу сигналов АЭ на фоне шума.

5. Разработана опытная установка и проведены экспериментальные исследования трубопроводов.

6. На основе теоретических и экспериментальных исследований разработан метод контроля дефектов трубопроводов акустической эмиссией на основе вейвлет фильтрации.

Поставленная цель диссертационной работы достигнута.

ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

По теме диссертации опубликована 21 печатная работа, в том числе 3 статьи в журналах, включенных в перечень ВАК, 2 патента на полезную модель, 2 свидетельства о государственной регистрации программы для ЭВМ.

Публикации в изданиях, включенных в перечень ВАК РФ:

1. Ваньков Ю.В., Серов В.В., Зиганшин Ш.Г., **Измайлова Е.В.** Изучение влияния коррозионных дефектов на параметры колебаний трубопроводов на ранней стадии зарождения / Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. – 2011. – № 11-12. – С. 141-149. – ISSN 1998-9903.

2. Акутин М.В., Ваньков Ю.В. **Измайлова Е.В.** Метод контроля технического состояния лопаток ГТУ по параметрам свободных колебаний / Вестник КГТУ им. А.Н.Туполева». – 2012. – № 3. – С. 26-32. – ISSN 2078-6255.

3. **Измайлова Е.В.**, Ваньков Ю.В. Выделение сигналов акустической эмиссии на фоне шумов вейвлет фильтрацией / Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. – 2013. – № 9-10. – С. 135-138. – ISSN 1998-9903.

Свидетельства и патенты:

4. Патент РФ № 108551, МПК F 17 D 3/00. Устройство для диагностирования трубопроводов / Серов В.В., Ваньков Ю.В., Зиганшин Ш.Г., Акутин М.В., Измайлова Е.В. – Опубл. 20.09.2011, Бюл. № 26.

5. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2011618176 Neurotracer / Серов В.В., Ваньков Ю.В., Зиганшин Ш.Г., Акутин М.В., Измайлова Е.В. Зарегистрировано в Реестре программ для ЭВМ. 18.10.2011.

6. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2012617704 FlawDefiner / Измайлова Е.В., Ваньков Ю.В., Серов В.В., Горбунова Т.Г. Зарегистрировано в Реестре программ для ЭВМ. 27.08.2012.

7. Патент РФ № 129255, МПК G 01 N 29/00. Установка для мониторинга состояния трубопроводов / Измайлова Е.В., Ваньков Ю.В., Серов В.В., Загретдинов А.Р., Кондратьев А.Е. – Опубл. 20.06.2013, Бюл. № 17.

Публикации в других изданиях:

8. Izmailova E. & Vankov Y. The use of the virtual LabVIEW instrument in acoustic emission control of condition of heat networks // «Scientific enquiry in the contemporary world: theoretical basics and innovative approach» – USA: L&L Publishing, Titusville, FL, 2012. Vol. 4 Technical Sciences, ISBN-13: 978-1481823036, ISBN-10: 1481823035, P. 110 – 112.

9. Ваньков Ю.В., Серов В.В., Зиганшин Ш.Г., Измайлова Е.В. Методы колебаний при контроле трубопроводных систем / В мире неразрушающего контроля. Серия Акустический контроль. – 2013. – № 3(61). – С. 54-58. – ISSN 1609-3178.

Публикации в материалах конференций:

10. Измайлова Е.В., Ваньков Ю.В. «Использование виртуального прибора LabVIEW при контроле акустической эмиссией» / Материалы XIX Международной научно-технической конференции «Радиоэлектроника, электротехника и энергетика» – Москва: МЭИ, 2013. Т. 2, С. 111.

11. Измайлова Е.В., Ваньков Ю.В. Снижение трудоемкости акустической диагностики состояния трубопроводов / Материалы XIX Международной научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых «Современные техника и технологии» СТТ-2013 – Томск: ТПУ, 2013. Т. 1, С. 160 – 161.

12. Измайлова Е.В., Ваньков Ю.В. Акустико-эмиссионный диагностический комплекс / Материалы VIII Международной научно-технической конференции «ЭНЕРГИЯ-2013» – Иваново: ИГЭУ, 2013. Т. 1, Ч. 1, С. 109 – 112.

13. Ваньков Ю.В., Серов В.В., Ярцева Н.В., Измайлова Е.В. Анализ изменения частот трубопровода в результате развития коррозионного дефекта и варьирования давления теплоносителя / Материалы XI Международного симпозиума «Энергоресурсоэффективность и энергосбережение» – Казань: ГАУ «Центр энергосберегающих технологий РТ при КМ РТ», 2010. С. 189 – 195.

14. Измайлова Е.В., Ваньков Ю.В. Метод акустической эмиссии при диагностировании состояния тепловых сетей / Материалы Международной научно-технической конференции «Состояние и перспективы развития электротехнологии» (XVI Бенардосовские чтения) – Иваново: ИГЭУ, 2011. С. 195 – 198.

15. Измайлова Е.В., Ваньков Ю.В. Акустическая эмиссия при контроле состояния тепловых сетей / Материалы Международной молодежной научной конференции «Научному прогрессу–творчество молодых» – Йошкар-Ола: ПГТУ, 2011. Ч.2, С.92–93.

16. Измайлова Е.В., Ваньков Ю.В. Разработка методики контроля тепловых сетей методом акустической эмиссии / Материалы XXIII Всероссийской межвузовской научно-технической конференции «Электромеханические и внутрикамерные процессы в энергетических установках, струйная акустика и диагностика, приборы и методы контроля природной среды, веществ, материалов и изделий» – Казань: КВАКУ, 2011. Ч. 1, С. 38 – 39.

17. Измайлова Е.В., Ваньков Ю.В. Нахождение местоположения дефекта трубопровода методом акустической эмиссии в среде графического программирования LabVIEW / Материалы XII Международного симпозиума «Энергоресурсоэффективность и энергосбережение» – Казань: ГАУ «Центр энергосберегающих технологий РТ при КМ РТ», 2011. С. 316 – 323.

18. Измайлова Е.В., Ваньков Ю.В. Регистрация параметров сигнала источника акустической эмиссии в LabVIEW / Материалы VII Региональной научно-технической конференции (с международным участием) «ЭНЕРГИЯ-2012» – Иваново: ИГЭУ, 2012. С. 66 – 70.

19. Измайлова Е.В., Ваньков Ю.В. Реализация суммарного счета импульсов акустической эмиссии при диагностировании дефектов трубопровода в среде LabVIEW / Материалы VII Международной молодежной научной конференции «Тинчуринские чтения» – Казань: КГЭУ, 2012г. Т. 2, С. 77 – 78.

20. Измайлова Е.В., Ваньков Ю.В. Реализация источника Су-Нильсена для проверки работоспособности акустико-эмиссионной аппаратуры / Материалы Международной научно-практической конференции «Измерения: Состояние, перспективы развития» – Челябинск: ЮУрГУ, 2012. Т. 1, С. 115 – 117.

21. Измайлова Е.В., Ваньков Ю.В. Диагностирование дефектов трубопровода с помощью разработанного мобильного устройства / Материалы VIII Международной молодежной научной конференции «Тинчуринские чтения» – Казань: КГЭУ, 2013. Т. 2, С. 70 – 71.

Подписано к печати
Гарнитура «Times»
Физ. печ. л. 1,0
Тираж 100 экз.

05.11.2013
Вид печати РОМ
Усл. печ. л. 0,94
Заказ № 4691

Формат 60x84/16
Бумага офсетная
Уч.-изд. л. 1,0