

На правах рукописи

Овчинников Алексей Львович

**ОСОБЕННОСТИ РАСПРОСТРАНЕНИЯ СИГНАЛОВ
АКУСТИЧЕСКОЙ ЭМИССИИ УТЕЧЕК В ТРУБОПРОВОДАХ
С ЖИДКОСТЬЮ И АППАРАТУРА КОНТРОЛЯ
ГЕРМЕТИЧНОСТИ**

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

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Томск 2006

Работа выполнена в Федеральном государственном научном учреждении
«Научно-исследовательский институт интроскопии»

Научный руководитель: доктор технических наук, профессор
Чахлов Владимир Лукьянович

Официальные оппоненты: доктор технических наук, профессор
Евтушенко Геннадий Сергеевич

доктор технических наук, профессор
Кербель Борис Моисеевич

Ведущая организация: Закрытое акционерное общество
«Элтест», г. Москва

Защита состоится « 19 » декабря 2006 г. в 15 часов на заседании
диссертационного совета Д212.269.09 Томского политехнического университета
по адресу: 634028, г. Томск, ул. Савиных, 7, библиотека НИИ интроскопии.

С диссертационной работой можно ознакомиться в научно-технической
библиотеке Томского политехнического университета по адресу: г. Томск, ул.
Белинского, 53

Автореферат разослан « 15 » ноября 2006 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета
к.т.н., доц.

Винокуров Б.Б.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. К настоящему времени трубопроводы являются основным видом транспорта газа, нефти и нефтепродуктов, так весь природный газ и 99,8% нефти добываемых в России транспортируется по трубопроводам. Общая протяженность магистральных трубопроводов достигла 215 тыс. км, промышленных – более 300 тыс. км. При этом более 55% магистральных трубопроводов находятся в эксплуатации более 20 лет. Для снижения числа аварий магистральные нефтепроводы подвергаются почти стопроцентному контролю с помощью средств внутритрубной диагностики. Однако, не смотря на это, к настоящему времени не удается полностью исключить аварии и отказы в виде утечек и порывов, которые представляют прямую угрозу населению страны и окружающей среде. Еще большее количество аварий случается на объектах коммунальных служб. Так тепло- и водоснабжающие трубопроводные сети в большей мере подвержены коррозии, и процессам трещинообразования, поскольку они не содержат средств электрохимической защиты и в процессе сооружения и эксплуатации не подвергаются дефектоскопическому контролю. В результате в настоящее время во многих населенных пунктах России ресурс трубопроводных сетей коммунальных служб выработан на 70-80 процентов, сети имеют множество утечек.

В настоящее время разработано большое многообразие методов и средств контроля герметичности. При этом для контроля герметичности трубопроводов наибольшее распространение получил метод акустической эмиссии (АЭ). Метод позволяет дистанционно обнаруживать малые утечки, определять их местоположение и судить о характере повреждения. Разработанные на основе метода АЭ течеискатели, по способу обработки сигнала можно разделить на две группы: корреляционные и амплитудные. Высокая помехозащищенность амплитудных алгоритмов обработки сигналов АЭ предопределила разработку на их основе систем непрерывного контроля герметичности, для которых наиболее важным является быстрое и достоверное определение наличия течи, при минимальном значении вероятности ложного срабатывания. Однако платой за это является не большая зона контроля (100 – 200м), что существенно осложняет проведение контроля протяженных участков, и ограничивает применение разработанной аппаратуры. В задачах же где главным является определение координат утечки (поиск утечек в условиях города), наибольшее распространение получили корреляционные алгоритмы обработки сигналов, позволяющие локализовать утечку с точностью до 1м. Однако при этом они характеризуются плохой помехозащищенностью (спектр полезного сигнала и спектр шума перекрываются) и низкой чувствительностью, что не приемлемо для контроля нефтепроводов, поскольку даже не значительная утечка может привести к серьезным экологическим последствиям. Кроме этого не разработано аппаратуры, позволяющей с высокой точностью локализовать утечку при одностороннем доступе к объекту контроля. При этом такая аппаратура может быть полезна для поиска утечек под зданиями и сооружениями и для контроля приурезных участков подводных трубопроводов.

Вышеизложенные ограничения области применения и недостатки существующих приборов, делают актуальной задачу разработки новых акустико-эмиссионных течеискателей и совершенствования уже существующих приборов. Вместе с тем, для этого имеются трудности, обусловленные

недостаточным исследованием закономерностей распространения сигналов АЭ по трубопроводам с движущейся жидкостью, проложенных в грунте. Так, теоретически не объяснена зависимость коэффициента поглощения сигнала АЭ от расстояния, не достаточно исследовано влияние грунта на характер распространения сигнала, не изучена пространственная структура поля АЭ в трубопроводе и возможность фильтрации отдельных мод волновода, не исследованы нелинейные эффекты, распространения сигналов АЭ, не установлено влияние на погрешность локализации корреляционных приборов многомодового характера распространения сигнала АЭ и дисперсии фазовой скорости.

Целью работы является исследование распространения сигналов АЭ утечки в многомодовых, слоистонеоднородных волноводах, анализ нелинейных эффектов, возникающих при распространении сигнала АЭ и разработка на основе этих исследований новой и совершенствование существующей аппаратуры обнаружения утечек в трубопроводах.

Для достижения поставленной цели в работе сформулированы и решены следующие задачи:

1. изучение модовой структуры акустического поля в цилиндрическом, жидкостном волноводе с двухслойной стенкой;
2. теоретическое рассмотрение механизма ослабления сигнала АЭ и сопоставление полученных результатов, с имеющимися экспериментальными данными, с целью уточнения зависимости коэффициента поглощения от расстояния;
3. поиск информационных критериев для реализации алгоритмов обнаружения и локализации утечки, на трубопроводах с односторонним доступом с использованием статистических методов обработки сигналов;
4. поиск путей увеличения протяженности зоны контроля, охватываемой парой датчиков в системах непрерывного контроля герметичности;
5. повышение помехоустойчивости и чувствительности приборов использующих корреляционную обработку сигналов.

Методы выполнения исследований. Теоретическая часть работы выполнена на основе численного решения уравнений динамической теории упругости, уравнений безмоментной теории оболочек и уравнений нелинейной акустики. Обработка экспериментальных данных осуществлялась с использованием элементов теории вероятности и математической статистики, корреляционного и спектрального анализа.

Основные положения, выносимые на защиту:

1. Сигнал АЭ утечки, регистрируемый с внешней стороны трубопровода, является суперпозицией неоднородных мод жидкостного волновода, основным механизмом ослабления сигнала АЭ при этом является излучение энергии во внешнюю среду.
2. При прохождении зондирующего сигнала по трубопроводу через область жидкости с утечкой имеет место нелинейность, которая проявляется в виде эффектов ослабления амплитуды зондирующего сигнала.
3. Способ дальнего обнаружения утечки в трубопроводе, который основан на регистрации нелинейных искажений в зондирующем сигнале обусловленных его нелинейным взаимодействием с АЭ утечки.

Предложенный способ позволяет обнаруживать утечки с расходом 50л/час на расстоянии 1км.

4. Алгоритм локализации утечки с односторонним доступом, основанный на выделении отдельных мод волновода путем анализа авто- и взаимно корреляционных функций получаемых с разнесенных в пространстве преобразователей. Ошибка локализации предложенного алгоритма не превышает 2 – 2,5м.
5. Методика фильтрации сигналов АЭ при локализации утечки методом взаимной корреляции основанная на анализе функции когерентности и фазы взаимного спектра и позволяющая повысить точность локализации.

Научная новизна работы:

1. Установлено, что регистрируемый с внешней стороны трубопровода сигнал АЭ утечки является суперпозицией неоднородных мод жидкостного волновода, основным механизмом ослабления сигнала АЭ при этом является излучение энергии во внешнюю среду.
2. Получено и экспериментально подтверждено, что при прохождении зондирующего сигнала по трубопроводу через область жидкости с утечкой имеет место нелинейность, которая проявляется в виде эффектов ослабления амплитуды зондирующего сигнала, что может быть положено в основу метода дальнего обнаружения утечек.
3. Разработан алгоритм локализации утечки с односторонним доступом, основанный на выделении отдельных мод волновода путем анализа авто- и взаимно корреляционных функций получаемых с разнесенных в пространстве преобразователей.
4. Предложена методика фильтрации сигналов АЭ при локализации утечки методом взаимной корреляции основанная на анализе функции когерентности и фазы взаимного спектра и позволяющая повысить точность локализации.

Практическая значимость и внедрение результатов исследований.

1. Проведенные теоретические и экспериментальные исследования волноводного характера распространения сигналов АЭ утечек в трубах с жидкостью позволили разработать корреляционный течеискатель ТАК-2005. В разработанном приборе реализована функция обнаружения утечки при одностороннем доступе к дефектному участку трубопровода и методика фильтрации сигналов основанная на анализе функции когерентности и фазы взаимного спектра. Разработанный прибор испытывался в натуральных условиях при поиске утечек в трубопроводах тепловых сетей АО «Томскэнерго» и других предприятий г. Томска.
2. Разработан способ и макет устройства дальнего обнаружения утечки. Результаты работы нашли в отражение научно исследовательской работе «Дальнее обнаружение утечек в трубопроводах» Заказчик фирма Шлюмберже научно-исследовательский центр в Кембридже.

Достоверность основных теоретических положений и выводов подтверждена результатами экспериментальных исследований и эксплуатацией разработанного устройства в производственных условиях.

Апробация работы

Материалы диссертационной работы докладывались и обсуждались на следующих конференциях.

1. Межрегиональная научно-техническая конференция "Методы и средства контроля герметичности технологического оборудования, коммуникаций и промышленной продукции". г. Дзержинск, 14 мая, 1997 г.
2. II областная научно- практическая конференция "Качество во имя лучшей жизни", г. Томск, 1997г.
3. 15 Российская научно-техническая конференция -"Неразрушающий контроль и диагностика", Москва, 28 июня-2 июля 1999г.
4. Научная сессия МИФИ - 2001, Москва 22-26 января 2001г.
5. VIII региональная научно-техническая конференция "Неразрушающий контроль и техническая диагностика оборудования в процессе эксплуатации", Иркутск, 16-19 октября 2001г.
6. 3-я Международная конференция "Неразрушающий контроль и техническая диагностика в промышленности", Москва 17-19 марта 2004г.
7. межрегиональная научно-практическая конференция «Проблемы и перспективы развития минерально сырьевой базы и предприятий ТЭК Сибири», Томск, 2005г.
8. III международная научно-технической конференция «Новые материалы, неразрушающий контроль и наукоемкие технологии в машиностроении», Тюмень 2005

Личный вклад автора заключается в выполнении всех теоретических исследований изложенных в диссертации, разработке программ экспериментальных исследований и обработке результатов экспериментов, разработке программного обеспечения корреляционного течеискателя ТАК-2005 и структурной схемы системы дальнего обнаружения утечек. Постановка задачи исследований и общее руководство проводилось совместно проф. д.т.н. В.Л. Чахловым и к.т.н. заведующим лабораторией акустико-эмиссионных методов неразрушающего контроля Лапшиным Б.М. Разработка приборов велась под руководством Лапшина Б.М.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, списка использованных источников из 107 наименований шести приложений. Работа содержит 171 страниц основного текста, 6 таблиц, 46 рисунков, 90 формул.

Публикации. По теме диссертации опубликовано 16 печатных работ из них 6 статей в центральных отечественных изданиях, 10 тезисов докладов. Результаты исследований и разработок изложены также в отчетах о НИР и технической документации на разработанный течеискатель.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность работы, сформулированы цель и задачи исследований, дана общая характеристика выполненной работы, приведены практическая значимость, научная новизна и основные положения, выносимые на защиту.

В первой главе приведена характеристика объекта контроля, проанализированы основные причины возникновения сквозных дефектов, проведен обзор методов и средств контроля герметичности, действующих

трубопроводов, проанализированы основные требования, предъявляемые к методу контроля герметичности участков трубопроводов. В разделе 1.1. на основе проведенного обзора установлено, что на трубопроводах России основной причиной возникновения утечек является коррозия. Минимально возможной утечкой на трубопроводе является утечка с расходом более 50л/час, утечки меньшей величины функционируют не постоянно, повреждение забивается механическими примесями. Показано, что для обнаружения такой утечки наиболее перспективно использовать аппаратуру на основе акустико-эмиссионного метода. В связи с этим в разделах 1.2. – 1.4 рассмотрены физические основы генерации и распространения сигналов акустической эмиссии (АЭ) утечек. Приведены результаты имеющихся экспериментальных исследований, показывающих, что основным механизмом возникновения АЭ при утечках жидкости является гидродинамическая кавитация. Рассмотрены вопросы распространения сигнала АЭ по трубопроводу. Сделаны выводы о расхождении некоторых теоретических и экспериментальных данных по поглощению АЭ, недостаточном теоретическом и экспериментальном исследовании многомодового характера распространения сигнала АЭ в трубопроводе, и отсутствии данных по исследованию нелинейных эффектов, проявляющихся при кавитации. В разделе 1.5. рассмотрены акустические средства обнаружения утечек на трубопроводах, проанализированы их достоинства и недостатки. В разделе 1.6. сделаны выводы и сформулированы направления исследований и задачи диссертации.

Во второй главе рассмотрены вопросы теоретического исследования волноводного характера распространения сигналов акустической эмиссии в трубах с жидкостью.

Акустический тракт распространения сигналов АЭ утечки образован перекачиваемой жидкостью, стенкой трубопровода, пленочной антикоррозионной изоляцией и грунтом. Т.е. среда распространения сигнала является слоистонеоднородной. В определенной таким образом среде в разделе 2.1. методом нормальных волн исследовано поле на больших расстояниях от утечки. При этом предполагалось, что среда бездиссипативная и в ней распространяются упругие осесимметричные волны. В качестве исходных уравнений движения использовались уравнения движения в потенциалах, решения которых представлялись в виде цилиндрических функций. Граничные условия формулировались следующим образом: на границе труба грунт и труба жидкость выполняются равенства нормальных напряжений и смещений, на границе труба грунт касательные напряжения равны нулю, что обусловлено наличием слоя пленочной изоляции. Выражая напряжения и смещения через решения для потенциалов и подставляя полученные выражения в граничные условия, было получено дисперсионное уравнение, корни которого искались численными методами. Решение дисперсионного уравнения показало, что на больших расстояниях от утечки имеет место волноводное распространение звука, при этом характер поведения корней существенно зависит от соотношения скоростей в грунте и в перекачиваемой жидкости. Для плотных грунтов со скоростью звука большей скорости звука в жидкости корни дисперсионного уравнения всегда оказываются действительными, тогда как для рыхлых грунтов корни дисперсионного уравнения комплексные, т.е. имеет место «Черенковское» излучение энергии в грунт. Данный тип волн можно отнести к так называемым

вытекающим волнам, существующим на границе твердое полупространство жидкость.

В разделе 2.2. для количественной оценки различных механизмов ослабления рассчитывались внутренние потери энергии и потери энергии, обусловленные излучением. Для учета внутренних потерь в полученном дисперсионном уравнении действительные волновые числа заменялись комплексными, где мнимая часть волнового числа - коэффициент поглощения в соответствующем слое. При определении коэффициента поглощения в жидкости учитывались потери вызванные вязкостью и теплопроводностью, внутреннее трение в жидкости и трение жидкости о стенку трубы, коэффициенты поглощения в стали выражались через известный коэффициент потерь, который для стали IX18H9T равен $4,4 \cdot 10^{-4}$, коэффициент поглощения в грунте выбирался произвольно от $0,1\alpha$ до 100α , где α коэффициент поглощения в стали. Результаты расчетов коэффициентов поглощения за счет внутренних потерь представлены в таблице 1.

Таблица 1

Коэффициент поглощения, дБ/м					Примечание
Частота № моды	0,5 кГц	10 кГц	20 кГц	40 кГц	
0	0,008	0.0016	0.0022	0.0034	Излучение в грунт отсутствует
1	-	0.0016	0.0022	0.0034	
2	-	0.0016	0.0022	0.0034	

Коэффициенты ослабления, обусловленные излучением рассчитывались для сред без внутренних потерь. В качестве модели грунта использовалась модель сферической упаковки. Расчет излучения проводился для двух крайних случаев: все поры грунта заполнены водой и все поры заполнены воздухом. Результаты расчетов представлены в таблицах 2 и 3

Таблица 2

Коэффициент поглощения, дБ/м					Примечание
Частота № моды	0,2 кГц	10 кГц	20 кГц	40 кГц	
0	0,015	$1,11 \cdot 10^{-4}$	$2,25 \cdot 10^{-5}$	$2,53 \cdot 10^{-6}$	Грунт с низким газосодержанием
1	-	$1,19 \cdot 10^{-4}$	$2,23 \cdot 10^{-5}$	$2,44 \cdot 10^{-6}$	
2	-	$1,50 \cdot 10^{-4}$	$2,36 \cdot 10^{-5}$	$2,46 \cdot 10^{-6}$	

Таблица 3

Коэффициент поглощения, дБ/м					Примечание
Частота № моды	0,2 кГц	10 кГц	20 кГц	40 кГц	
0	0,023	$8,51 \cdot 10^{-5}$	$1,76 \cdot 10^{-5}$	$1,92 \cdot 10^{-6}$	Грунт с высоким газосодержанием
1	-	$9,12 \cdot 10^{-5}$	$1,72 \cdot 10^{-5}$	$1,88 \cdot 10^{-6}$	
2	-	$1,15 \cdot 10^{-4}$	$1,82 \cdot 10^{-5}$	$1,91 \cdot 10^{-6}$	

Как видно из таблиц коэффициенты ослабления, обусловленные внутренними потерями энергии на два порядка меньше коэффициентов ослабления наблюдаемых на практике, которые составляют $0,20 - 0.50$ дБ/м. Коэффициенты ослабления, обусловленные излучением также гораздо ниже реальных за исключением случая нулевой моды на низкой частоте, когда фазовая скорость приближается к критической (на частотах ниже критической волновод для данной нормальной моды запирается и волна распространяется с сильным затуханием). На основании этого сделано предположение, что

сигналы АЭ утечки, регистрируемые с внешней стороны трубопровода, являются суперпозицией неоднородных мод волновода, излучающих в процессе распространения энергию в грунт, а однородные моды локализованы внутри трубы и с внешней стороны не регистрируются.

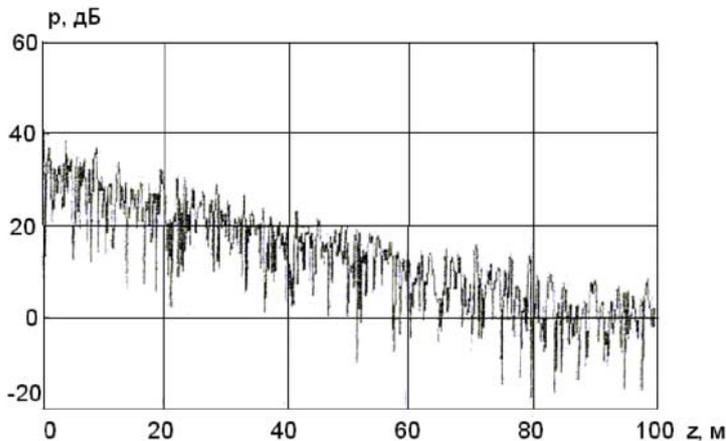


Рис. 1. Распределение поля давления монохроматического источника вдоль образующей трубопровода

Для проверки этого предположения в разделе 2.3. проводился расчет акустического поля точечного источника. В качестве уравнений движения в трубопроводе использовались уравнения движения оболочки. А грунт представлялся в виде жидкого полупространства. Диссипация энергии при расчетах не учитывалась. Решения получались путем обобщения на случай

непрерывного пространственного спектра известных решений для дискретного пространственного спектра, для чего в известных решениях ряды заменялись интегралами. На рис. 1 представлено распределение поля давления вдоль трубопровода. Как видно из рисунка поле имеет осциллирующий характер и затухает с расстоянием. Поскольку внутренние потери энергии не учитывались, ослабление поля с расстоянием, может быть обусловлено только излучением в грунт. При этом зависимость коэффициент ослабления от расстояния вызвана тем, что моды с более высокими номерами ослабляются быстрее. Осциллирующий характер объясняется взаимным влиянием мод.

Рассмотренные модели основаны на решении линейных уравнений, полученных в предположении малой интенсивности распространяющихся волн. Однако интенсивность звука при схлопывании одиночного кавитационного пузырька на его границе составляет величины порядка 1 Вт/м^2 . При таких интенсивностях возможны появления различных нелинейных эффектов. Поэтому в разделе 2.4 был проведен оценочный расчет нелинейного взаимодействия сигналов АЭ утечки с низкочастотным зондирующим сигналом. При этом считалось, что сигналы распространяются в виде плоских волн по одному бездисперсионному тракту в бездиссипативной среде. В предположении, что сигнал АЭ утечки является ограниченным по частоте белым шумом с нулевым средним, а частота зондирующего сигнала много меньше нижней частоты спектра, было получено, что закон убывания интенсивности монохроматической волны, распространяющейся в интенсивном поле утечки, может быть описан известной в теории нелинейных колебаний формулой Ахиезера.

$$I \sim \exp\left(-\frac{\varepsilon^2 E}{2\rho_0 c_0^3} \omega_0^2 \tau z\right) = \exp(-\alpha_s z), \quad (1)$$

где ε - параметр нелинейности; c_0 и ρ_0 - скорость звука и плотность покоящейся жидкости; ω_0 - частота зондирующего сигнала; τ - время

синхронного взаимодействия волн; z - расстояние $E = \rho_0 \sigma^2$ – объемная плотность звука; σ - дисперсия шума утечки

Оценочные расчеты поглощения по формуле (1) проводились на основе данных полученных в Шелл лаборатории при исследовании сигналов акустической эмиссии, зарегистрированных гидрофонами установленными внутри трубопровода. По результатам расчетов получено, что на частоте 100Гц коэффициент нелинейного поглощения будет составлять величину порядка $\alpha_s = 0.15$ дБ/м. При расчетах поглощения на всем пути распространения зондирующего сигнала следует учитывать конечную длину нелинейной области.

В заключение второй главы в разделе 2.5. был рассмотрен алгоритм локализации утечек при одностороннем доступе. Такой алгоритм может быть полезен для контроля труднодоступных участков трубопроводов, доступ к которым имеется с одной стороны, например, при контроле прирезной части подводного перехода трубопровода, когда сигнал регистрируется только на одном берегу. На рис. 2 представлена схема контроля при одностороннем доступе.

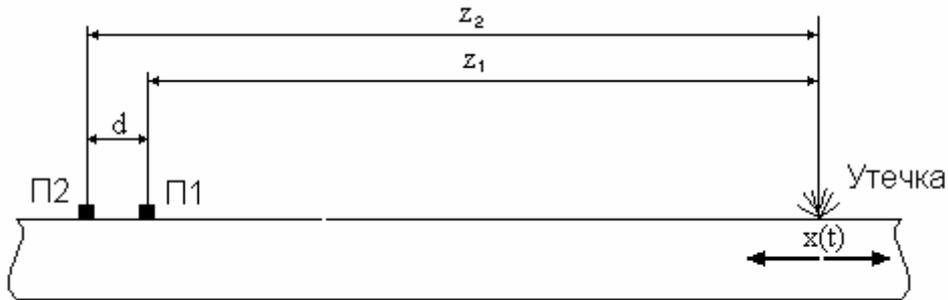


Рис. 2 Схема контроля при одностороннем доступе.

В условиях многомодового волновода сигналы, регистрируемые каждым из датчиков, можно представить в виде суммы интегралов свертки сигнала утечки в месте ее возникновения с импульсной переходной характеристикой отдельной моды. Пренебрегая наличием внешнего шума и представляя Фурье образ импульсной характеристики каждой моды в виде:

$$A_i(r, \varphi) \exp(-j2\pi f z/c_i - z\alpha(f))$$

получим выражение для автокорреляционных функций (АКФ) сигналов, регистрируемых каждым датчиком:

$$R_{y_1 y_1}(\tau) = R_{xx}(\tau) \sum_{i=1}^M A_i^2 e^{-\alpha z} + \sum_{i,j=1, i \neq j}^M A_{i1} A_{j2} e^{-\alpha z} R_{xx}\left(\tau + \frac{z}{c_i} - \frac{z}{c_j}\right)$$

$$R_{y_2 y_2}(\tau) = R_{xx}(\tau) \sum_{i=1}^M A_i^2 e^{-\alpha(z+d)} + \sum_{i,j=1, i \neq j}^M A_{i1} A_{j2} e^{-\alpha(z+d)} R_{xx}\left(\tau + \frac{z+d}{c_i} - \frac{z+d}{c_j}\right) \quad (2)$$

Здесь r, φ, z - орты цилиндрической системы координат; $R_{xx}(\tau)$ – АКФ сигнала утечки в месте ее возникновения; j - мнимая единица; $A_{ij}(r, \varphi)$ - некоторая функция координат r, φ ; c_i - групповая скорость i -ой моды; $\alpha(f)$ - коэффициент поглощения; z_i - расстояние от i -го датчика до утечки; d - расстояние между датчиками.

Если сигнал АЭ утечки является ограниченным по частоте белым шумом, то огибающие автокорреляционных функций, кроме основного максимума при

нулевой задержке (первая сумма в выражении (2) так называемая энергетическая часть), будут иметь ряд интерференционных максимумов, обусловленных взаимным влиянием трактов. Координаты каждого интерференционного максимума определяются:

$$\tau_{ij}^{(1)} = \frac{z}{c_i} - \frac{z}{c_j}; \quad \tau_{ij}^{(2)} = \frac{z+d}{c_i} - \frac{z+d}{c_j}$$

Откуда после несложных преобразований получим формулу для определения расстояния до утечки.

$$z = \frac{d}{\tau_{ij}^{(2)} - \tau_{ij}^{(1)}} \tau_{ij}^{(1)} = \frac{d}{\Delta \tau_{ij}} \tau_{ij}^{(1)} \quad (3)$$

Таким образом, суть предложенного алгоритма заключается в получении автокорреляционных функций сигналов, зарегистрированных разнонесенными в пространстве преобразователями, поиск координат интерференционных максимумов и вычисление по формуле (3) расстояния до утечки.

В третьей главе проводилась экспериментальная проверка полученных во второй главе теоретических выводов, а так же исследовалось влияние многомодового характера распространения на точность локализации корреляционных приборов, и трансформация спектров сигналов при контактной и бесконтактной регистрации сигналов.

В разделе 3.1. приведены результаты исследований статистических характеристик сигналов утечек различной конфигурации, показано, что сигнал утечки зарегистрированный с внешней стороны трубопровода является стационарным, эргодическим шумом с нормальной плотностью распределения.

В разделе 3.2. Описаны результаты экспериментальной проверки предположения о том, что сигнал АЭ регистрируемый со стенки трубопровода является суперпозицией неоднородных мод жидкостного волновода. Эксперименты проводились на участке действующего магистрального нефтепровода Александровское - Анжеро-Судженск. В ходе экспериментов в трубопровод вводился импульсный низкочастотный сигнал, который регистрировался пьезоэлектрическим преобразователем на различных расстояниях от излучателя, в качестве которого использовался ударный генератор. В диссертации подробно описана методика экспериментов, обоснован выбор для анализа низкочастотного сигнала. Получено, что в процессе распространения сигнала по трубопроводу происходит изменение его спектра (рис. 3), заключающееся в смещении максимумов и провалов, что характерно для сигналов распространяющихся по нескольким трактам. Обнаружена дисперсия фазовой скорости. Проводилась количественная оценка ослабления, для этого рассчитывались интегральные по спектру коэффициенты ослабления сигнала. Было получено, что коэффициент ослабления акустических сигналов в полосе от 0 до 800Гц составляет в среднем 0,17дБ/м. Для проверки механизма ослабления вызванного излучением энергии в грунт измерялось акустическое поле на поверхности грунта на различных расстояниях от оси трубы. Экспериментально получено, что при положении зондирующего излучателя в точке на расстоянии 100м исчезновение сигнала частотой до 800Гц, регистрируемого с поверхности грунта, наблюдается только при расположении приемного преобразователя на расстоянии более 10м от оси трубопровода, по мере приближения к трубе сигнал возрастает до максимума над осью нефтепровода.

Раздел 3.3. посвящен экспериментальной проверке нелинейности. Описана конструкция модельной установки, состоящая из участка трубы длиной 35м диаметром – 100мм и толщиной стенки – 4мм. На расстоянии 18м от одного из торцов в трубе имелось сквозное цилиндрическое отверстие диаметром 0,8мм, снабженное клапаном. При проверке нелинейного взаимодействия приемник и излучатель устанавливались на разных торцах трубы. В качестве зондирующего сигнала использовался импульсный сигнал в форме синусоиды, длительность которой могла состоять из одной или нескольких полуволн. Основная гармоника выбиралась равной 32.5; 75.00 и 1.5 кГц, т.е. были выбраны три частоты, из которых одна частота находилась в зоне утечки, вторая выше частоты излучения утечки, третья ниже основной частоты излучения утечки. Методика эксперимента сводилась к проверке выполнения принципа суперпозиции. Для точной фиксации времени прихода зондирующего сигнала проводилась временная селекция, для исключения статистических ошибок проводилась серия из 10 опытов, при вычислениях спектров и оценках амплитуд использовалось до 100 усреднений, для исключения влияния качества акустического контакта во всех опытах датчики не переставлялись. В

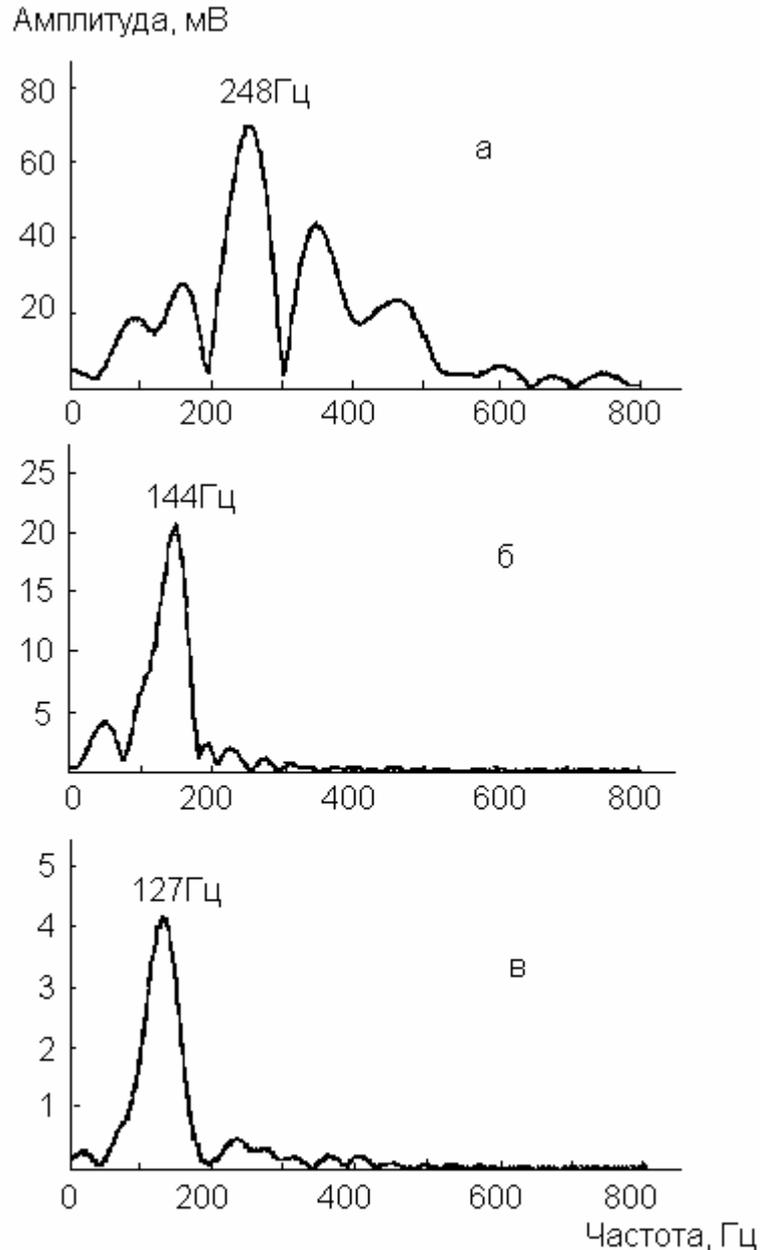


Рис. 3 Спектры акустического сигнала при различных расстояниях между излучателем и приемником (а - 29м; б - 98,5м; в - 172,5м)

результате экспериментов получено, что на частотах 32.5 и 75кГц нарушается принцип суперпозиции. Расхождение на частоте 32.5кГц для сигнала однократно прошедшего по трубе в среднем составило 0.61% для сигнала прошедшего по трубе три раза – 2.41%. На частоте 75кГц расхождение составило соответственно 0.30% и 1.2%. На частоте 1,5кГц в трубе не удалось получить однотонный сигнал. На основании проделанных экспериментов

сделан вывод, что при распространении сигналов АЭ утечки имеется нелинейность, проявляющаяся в более сильном ослаблении зондирующего сигнала.

Результаты проверки алгоритма локализации утечки при одностороннем доступе к трубопроводу представлены в разделе 3.4. Данная серия экспериментов также проводилась на модельной установке описанной в разделе 3.3. В таблице 4. представлены результаты экспериментов.

Таблица 4

Расстояние до утечки, м		Задержка 1-го макс. АКФ, мкс		Результаты локализации, м*	Погрешность, м
Датчик 1	Датчик 2	Датчик 1	Датчик 2		
2	5	526	270	3,16	1,16
6,5	8,5	265	215	8,5	2,5
7,5	13	937	479	5,75	1,25
13,5	14	195	177	14,16	0,66
14	15,5	177	158	12,8	1,2

Получено, что погрешность локализации метода может достигать 2-2,5м. Показано, что обусловлено это сложностью выделения в каждом канале корреляционных максимумов образованных модами с одинаковыми номерами, а также влиянием боковых максимумов энергетической части автокорреляционной функции. Предложено для минимизации погрешности выделять первый боковой максимум и для него проводить локализацию.

При проведении экспериментов было обнаружено, что спектры сигнала одной и той же утечки существенно отличаются при контактной (со стенки трубы) и бесконтактной регистрации. При бесконтактной регистрации в спектре сигнала преобладают высокочастотные составляющие, что согласуется с данными других исследований. В то время как при регистрации со стенки трубы с использованием тех же преобразователей основная мощность сигнала сосредоточена в полосе до 5кГц. В разделе 3.5. на основе анализа спектрального состава сигналов утечки на различных расстояниях от нее показано, что это обусловлено не более слабым поглощением низкочастотных составляющих, а их более эффективным возбуждением.

В разделе 3.6. проанализировано влияние на точность локализации корреляционного метода многомодового характера распространения. Рис. 4 иллюстрирует полученные результаты. Как видно из рис.4а корреляционная функция содержит большое количество максимумов, выделить среди которых максимум, позволяющий без дополнительной обработки сигналов определить расстояние до утечки не представляется возможным. Для повышения точности локализации в современных корреляционных течеискателях проводится фильтрация сигналов в полосе, где функция когерентности или взаимный спектр имеют наибольшее значение. Использовать такую методику фильтрации в данном случае оказывается малоэффективно, поскольку как видно из рис. 4б сигналы, регистрируемые датчиками, когерентны практически во всем анализируемом частотном диапазоне. Для получения точных результатов предложено фильтрацию сигналов проводить в узкой полосе, в которой фаза взаимного спектра хорошо аппроксимируется пилообразной функцией, (рис.4в). Функция взаимной корреляции при этом будет иметь один максимум рис. 4г.

В разделе 3.7. на основании вероятностного анализа обнаружения утечки и реальных экспериментальных данных по поглощению сигналов АЭ на действующих трубопроводах оценивалась длина зоны контроля для различных алгоритмов обнаружения. Получено, что использование

взаимнокорреляционного метода по сравнению с амплитудным методом позволит существенно увеличить зону контроля до двух раз, при неизменных условиях контроля и одинаковой пороговой чувствительности.

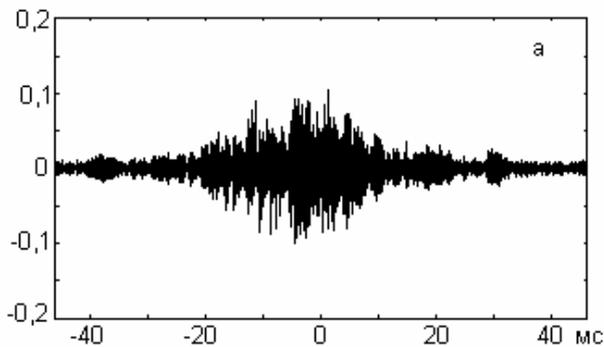


Рис.4а Нормированная взаимнокорреляционная функция без фильтрации

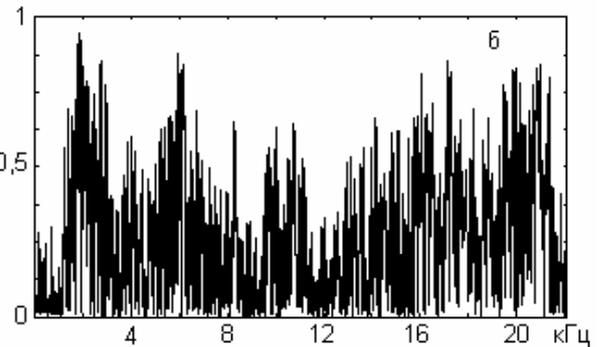


Рис.4б Функция когерентности

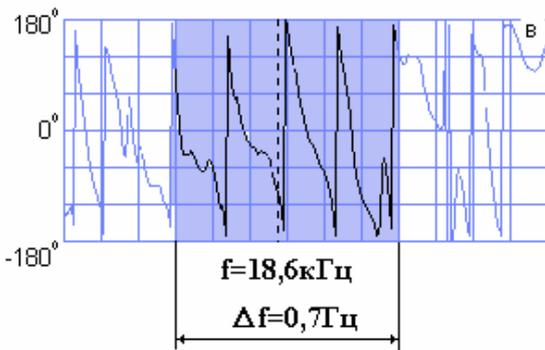


Рис. 4в Участок фазы взаимногоспектра

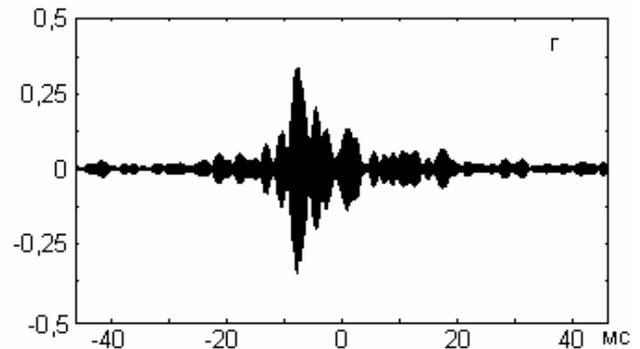


Рис.4г Нормированная взаимнокорреляционная функция после фильтрации в полосе $f=18,6\text{кГц}$ $\Delta f=0,7\text{кГц}$

В четвертой главе изложены результаты разработки акустико-эмиссионных средств обнаружения утечек.

В разделе 4.1. Более детально проанализированы достоинства и недостатки существующей аппаратуры и на основе этого сформулирована задача разработки приборов. Для периодического поиска утечек в трубопроводах наиболее перспективна разработка прибора, в котором реализованы традиционный корреляционный алгоритм локализации, алгоритм локализации при одностороннем доступе и методика фильтрации сигналов, основанная на анализе фазы взаимного спектра. В основу реализации устройства непрерывного контроля герметичности может быть положен эффект нелинейного взаимодействия. Предлагаемое устройство будет обладать чувствительностью соизмеримой с чувствительностью акустико-эмиссионных систем за счет косвенной регистрации АЭ, основанной на регистрации нелинейных изменений в зондирующем сигнале при его распространении по трубопроводу, и в то же время позволит обнаружить утечку одним приемным преобразователем на расстоянии 1 - 2км, за счет соответствующего выбора частоты и амплитуды зондирующего сигнала.

В разделе 4.2. Описаны конструкция, программное обеспечение и алгоритм обработки сигналов корреляционного течеискателя ТАК-2005.

Прибор ТАК-2005 предназначен для обнаружения утечек (свищей, трещин) в подземных трубопроводах в процессе их сооружения и эксплуатации. Чувствительность прибора 8 – 50л/час в зоне контроля - 200м. Частотный диапазон 100Гц – 20кГц. Контроль производится с помощью двух акустических зондов, устанавливаемых на стенку трубы по обе стороны от предполагаемого месторасположения утечки. Координаты утечки при этом определяются традиционным методом по максимуму функции взаимной корреляции. В случае если имеется только одна точка контроля (односторонний доступ), локализация утечки осуществляется при помощи алгоритма основанного на анализе автокорреляционных функций. Структурная схема прибора включает в себя два приемных преобразователя, два предварительных усилителя с большим динамическим диапазоном, аттенюатор, основной усилитель, плату аналого-цифрового интерфейса и портативный компьютер, посредством программного обеспечения которого производится обработка сигналов, ввод исходных данных и отображение результатов контроля.

Конструктивно прибор состоит из двух зондов, в которых расположены приемные преобразователи и предварительные усилители, двухканального блока группового усилителя и портативного компьютера. В качестве устройства для реализации аналого-цифрового интерфейса применен серийно выпускаемый PCMCIA модуль типа DAQCard-6036E фирмы National Instruments.

Программное обеспечение прибора состоит из главного исполняемого модуля, динамически подключаемых библиотек, выполняющих функцию обработки сигналов и драйвера платы АЦП (драйвер разработан поставщиком платы АЦП).

В задачи программного обеспечения входят: запись и обработка сигналов (получение корреляционных функций и нахождение их экстремумов, вычисление спектров и функции когерентности, цифровая фильтрация сигналов), ввод данных об условиях контроля, и отображение его результатов, сохранение собранных данных на жестком диске компьютера, печать графиков и получение справочных сведений о порядке работы с прибором.

Интерфейс пользователя программы разработан в соответствии с требованиями операционной системы (ОС) Windows, и включает в себя стандартные элементы управления этой ОС: меню, кнопки управления, текстовые поля и окна.

В разделе 4.3. приведено описание физических принципов и макета устройства дальнего обнаружения утечек. Предлагаемое устройство состоит из двух блоков: блока генератора расположенного на одном конце контролируемого участка и блока приемно-регистрирующей аппаратуры, работа устройства управляется микроконтроллером. Для увеличения эффектов нелинейного взаимодействия в качестве генератора зондирующего сигнала использован генератор волны давления, поскольку волна давления имеет высокую интенсивность и ее распространение также сопровождается нелинейными эффектами.

Суть работы устройства заключается в следующем. Предварительно с целью формирования опорного сигнала и измерения его параметров проводится калибровка аппаратуры. При этом трубопровод должен работать в штатном режиме и на контролируемом участке не должно быть сквозных повреждений. По команде микроконтроллера формируется зондирующий сигнал, амплитуда, частота и длительность которого задаются микроконтроллером. Сформированный зондирующий сигнал с помощью

генератора волны давления вводится в трубопровод. Через определенный момент времени микроконтроллер по шине данных считывает оцифрованный и предварительно обработанный сигнал зарегистрированный приемным преобразователем. Из зарегистрированного сигнала в микроконтроллере с помощью амплитудной и временной дискриминации выделяется зондирующий сигнал, оцениваются его амплитуда, фаза, длительность и время распространения. Если амплитуда зондирующего сигнала менее чем на 10дБ выше уровня собственных шумов трубопровода, микроконтроллер изменяет параметры зондирующего сигнала, передаваемые в генератор, и повторяет процедуру калибровки. После того, как найдена приемлемая амплитуда сигнала, микроконтроллер проверяет стабильность акустического тракта, для чего сформированный зондирующий сигнал несколько раз пропускается по трубопроводу. Если достигнута требуемая стабильность, параметры зарегистрированного сигнала сохраняются как параметры опорного сигнала в запоминающем устройстве микроконтроллера, калибровка прекращается и устройство переводится в режим контроля.

В режиме контроля микроконтроллер периодически инициирует ввод зондирующего сигнала и его обработку. При этом обработка сигнала отличается от режима калибровки тем, что параметры зарегистрированного сигнала сравниваются с аналогичными параметрами опорного сигнала, полученного при калибровке системы. При нарушении герметичности трубопровода, в микроконтроллере фиксируются изменения в зондирующем сигнале, вызванные эффектами его взаимодействия с утечкой. Эта информация несколько раз перепроверяется. Ложная информация, которая может возникнуть при прохождении по трубопроводу очистных и дефектоскопических устройств, его размыве (в случае подводных трубопроводов), изменении скорости перемещения жидкости по трубе исключается микроконтроллером с помощью соответствующего программного обеспечения. Если подтверждается аварийная ситуация, то по линии аварийной сигнализации микроконтроллера подается сигнал «Авария» на блок телемеханики.

В заключении сформулированы выводы по диссертационной работе.

В приложении диссертации приведены акты испытаний Течеискателя ТАК-2005 и акты об использовании результатов работы.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

1. Проведен анализ причин отказов линейной части трубопроводов. Показано, что наибольшее число аварий на магистральных трубопроводах России является результатом коррозии.

2. На основании анализа методов и средств контроля герметичности действующих трубопроводов показано, что наиболее перспективным методом контроля протяженных участков, позволяющим охватить весь диапазон возможных утечек и отвечающим требованиям экономичности, высокой надежности, простоты обслуживания является метод акустической эмиссии.

3. Экспериментально исследованы статистические и спектральные характеристики сигналов АЭ утечки жидкости в жидкость. Установлено, что сигнал АЭ является эргодическим, стационарным, широкополосным, случайным процессом с нормальной плотностью распределения вероятности.

Спектральная плотность сигналов АЭ зависит от способа их регистрации, что обусловлено влиянием импульсной переходной характеристики трубопровода.

4. На основании аналитических расчетов и сопоставления полученных результатов с имеющимися экспериментальными данными получено: регистрируемый с внешней стороны трубопровода сигнал АЭ утечки является суперпозицией неоднородных мод жидкостного волновода, основным механизмом ослабления сигнала АЭ при этом является излучение энергии во внешнюю среду; нормальные моды локализованы внутри трубы и с внешней стороны не регистрируются; наблюдаемая на практике зависимость коэффициента затухания вдоль трассы трубопровода обусловлена интерференцией отдельных составляющих пространственного спектра; коэффициент затухания, вызванный излучением растет с ростом диаметра трубопровода и с увеличением насыщенности грунта водой.

5. Теоретически получено и экспериментально подтверждено, что при прохождении зондирующего сигнала по трубопроводу через область жидкости с утечкой имеет место нелинейность, которая проявляется в виде эффектов ослабления амплитуды зондирующего сигнала, что может быть положено в основу метода дальнего обнаружения утечек.

6. Разработан алгоритм локализации утечки с односторонним доступом, основанный на выделении отдельных мод волновода путем анализа авто- и взаимно корреляционных функций получаемых с разнесенных в пространстве преобразователей. Экспериментально получено, что ошибка локализации предложенного алгоритма не превышает 2 – 2,5м.

7. Установлено, что многомодовый характер распространения сигналов АЭ по трубопроводу приводит к снижению точности локализации утечки методом взаимной корреляции. Для повышения точности следует проводить полосовую фильтрацию в полосе, где функция когерентности не имеет значительных провалов, а фаза взаимного спектра имеет вид пилообразной функции, отдельные звенья которой хорошо аппроксимируются линейной зависимостью.

8. На основании вероятностного анализа обнаружения утечки и реальных экспериментальных данных по поглощению сигналов АЭ на действующих трубопроводах получено, что использование взаимнокорреляционного метода по сравнению с амплитудным методом позволит существенно увеличить зону контроля до двух раз, при неизменных условиях контроля и одинаковой пороговой чувствительности.

9. На основе проведенных теоретических и экспериментальных исследований разработан акустико-эмиссионный корреляционный течеискатель ТАК-2005, в котором реализована функция обнаружения утечки при одностороннем доступе и алгоритм автоматической настройки параметров фильтра, основанный на анализе фазы взаимного спектра. Чувствительность прибора 8 – 50л/час в зоне контроля - 200м. Частотный диапазон 100Гц – 20кГц, что обеспечивает высокую помехозащищенность прибора при поиске утечек в сильно зашумленных условиях. Прибор прошел испытания на трубопроводах АО «Томскэнерго», и ряде других предприятиях г. Томска.

10. Предложен новый способ дальнего обнаружения утечек в трубопроводах и разработана структурная схема устройства, его реализующая. Способ основан на регистрации нелинейных искажений в зондирующем сигнале обусловленных его нелинейным взаимодействием с АЭ утечки. Предложенный метод позволяет обнаруживать утечки с расходом 50л/час на расстоянии 1км.

Основные результаты диссертации опубликованы в следующих работах:

1. Лапшин Б.М., Овчинников А.Л. Разработка преобразователей акустической эмиссии для бесконтактного обнаружения и локализации протечек в запорной газовой арматуре и элементах трубопроводов // Тез. докл. межрегиональной научно-технической конференции "Методы и средства контроля герметичности технологического оборудования, коммуникаций и промышленной продукции". г. Дзержинск, 14 мая, 1997 г., с. 8
2. Лапшин Б.М., Овчинников А.Л. Перспективы развития акустико-эмиссионной системы непрерывного контроля герметичности экологически опасных участков нефтепроводов. // Тез. докл. II областной научно- практической конференции "Качество во имя лучшей жизни", г. Томск, 1997г. с.104-105
3. Лапшин Б.М., Овчинников А.Л. Исследование распространения упругих волн в трубах с жидкостью при акустико-эмиссионном обнаружении утечек // Дефектоскопия 1998. №7. С. 25-32.
4. Лапшин Б.М., Овчинников А.Л. Исследование распределения энергии сигнала акустической эмиссии по отдельным модам в жидкостном волноводе. // Контроль и диагностика №2 1999г с.9-12
5. Лапшин Б.М., Овчинников А.Л. Акустико-эмиссионный метод обнаружения утечек на трубопроводах с односторонним доступом. // тез. докл. 15 Российской научно-технической конференции -"Неразрушающий контроль и диагностика", Москва, 28 июня-2 июля 1999г. с 118
6. Лапшин Б.М., Овчинников А.Л. Исследование распределения энергии сигнала акустической эмиссии по отдельным модам в жидкостном волноводе. // тез. докл. 15 Российской научно-технической конференции - "Неразрушающий контроль и диагностика", Москва, 28 июня-2 июля 1999г. с 153
7. Кумов В.С., Лапшин Б.М., Обгольц А.А., Овчинников А.Л., Сидуленко О.А., Хромов И.Г. Многофункциональный акустико-эмиссионный течеискатель для экологически безопасной эксплуатации магистральных трубопроводов. // Безопасность труда в промышленности, №11 1999, с.27-28
8. Лапшин Б.М., Овчинников А.Л. Исследование статистических характеристик сигналов акустической эмиссии для задач контроля герметичности экологически опасных участков трубопроводов. // Тез. докл. Научной сессии МИФИ - 2001, Москва 22-26 января 2001г.
9. Лапшин Б.М., Овчинников А.Л. Акустико-эмиссионные средства контроля герметичности элементов трубопроводов // Тез. докл. VIII региональной научно-технической конференции "Неразрушающий контроль и техническая диагностика оборудования в процессе эксплуатации", Иркутск, 16-19 октября 2001г., с. 19-23
10. Лапшин Б.М., Овчинников А.Л. Акустико-эмиссионный течеискатель для контроля герметичности труднодоступных участков трубопроводов. // Тез. докл. VIII региональной научно-технической конференции "Неразрушающий контроль и техническая диагностика оборудования в процессе эксплуатации", Иркутск, 16-19 октября 2001г. с. 99-102
11. Лапшин Б.М. Овчинников А.Л. Особенности применения корреляционного метода локализации утечек на слабо демпфированных трубопроводах малой длины. // Тез. Доклада 3-й Международной конференции

- "Неразрушающий контроль и техническая диагностика в промышленности",
Москва 17-19 марта 2004г. с. 188
12. Лапшин Б.М. Овчинников А.Л. Взаимно спектральный метод обнаружения утечки на трубопроводах с односторонним доступом. // Дефектоскопия, №9, 2004г. с.19-26
 13. Lapshin B.M., Ovchinnikov A.L. A Cospectral Method for Leak Detection in One-Way Access Pipeline. // Russian Journal of Nondestructive Testing, Vol.40, No9 2004, pp. 587 – 592
 14. Лапшин Б.М. Овчинников А.Л. Акустические течеискатели для обнаружения мест утечек нефти на подземных и подводных трубопроводах // Материалы межрегиональной научно- практической конференции. Проблемы и перспективы развития минерально сырьевой базы и предприятий ТЭК Сибири. – Томск: Издательство ТПУ, 2005г. с. 90 – 91
 15. Лапшин Б.М. Овчинников А.Л. Течеискатели ТАК-2004 и ТАК-2005 для обнаружения утечек на подводных трубопроводах. // Материалы III международной научно-технической конференции «Новые материалы, неразрушающий контроль и наукоемкие технологии в машиностроении». – Тюмень: Феликс, 2005. С. 312 – 313
 16. Багаманов М.Н., Лапшин Б.М., Овчинников А.Л. Течеискатель для подводных трубопроводов. // Томские недра, №1, 2006, с. 26-28.