

На правах рукописи

Сыч Татьяна Викторовна

**СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИИ
АКУСТИКО-ЭМИССИОННОГО КОНТРОЛЯ НА ОСНОВЕ
КОНЕЧНО-ЭЛЕМЕНТНОГО АНАЛИЗА АКУСТИЧЕСКОГО ТРАКТА**

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

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Томск – 2016

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Сибирский государственный университет путей сообщения»

Научный руководитель:
(консультант) доктор технических наук, профессор
Герасимов Сергей Иванович

Официальные оппоненты: Панин Сергей Викторович
доктор технических наук, профессор,
Федеральное государственное бюджетное учреждение науки «Институт физики прочности и материаловедения» Сибирского отделения Российской академии наук, зам. директора по научной работе

Муравьев Виталий Васильевич
доктор технических наук, профессор
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Ижевский государственный технический Университет имени М. Т. Калашникова», зав. кафедрой «Приборы и методы измерений, контроля, диагностики»

Ведущая организация: Федеральное государственное унитарное предприятие «Сибирский научно-исследовательский институт авиации имени С.А.Чаплыгина»
(ФГУП «СибНИА м.С.А.Чаплыгина»)

Защита состоится « ____ » _____ 2016 г. в _____. на заседании диссертационного совета Д 212.269.09 при ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский Томский политехнический университет» по адресу: 634028, г. Томск, ул. Савиных, 7, ауд. ____.

С диссертационной работой можно ознакомиться в библиотеке ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский Томский политехнический университет» и на сайте: <http://portal.tpu.ru/council/916/worklist>

Автореферат разослан « ____ » _____ 2016 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета
кандидат технических наук, доцент

Васендина
Елена Александровна

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования

При акустико-эмиссионном контроле ответственных конструкций важным является повышение точности определения координат источников акустической эмиссии. Для этого необходим детальный анализ процесса распространения акустико-эмиссионных волн в объектах контроля с различными особенностями.

Теоретическое решение волнового уравнения для задач распространения акустических волн в твердых телах, имеющих геометрические и физические неоднородности, сложные граничные и начальные условия, затруднено.

Численные методы дают возможность прогнозирования напряженно-деформированного состояния объекта, его динамического отклика на различные воздействия. По сравнению с аналитическим решением, при численном анализе можно получить информацию о расположении локальных зон объекта контроля с наибольшими перемещениями или концентрацией напряжений.

При установке преобразователей акустической эмиссии в места с наибольшим значением нормальных перемещений исследуемой поверхности объекта, на выходе преобразователя будет формироваться максимальный сигнал.

В настоящее время места установки пьезоэлектрических преобразователей определяются по результатам трудоёмких предварительных экспериментов. Численный же анализ процесса распространения акустико-эмиссионных волн может быть проведен для объектов с различной геометрией с учетом их особенностей и требует меньше затрат, при этом позволяет прогнозировать поведение поверхности объекта контроля. В связи с этим разработка численных алгоритмов расчета акустического тракта и анализ результатов расчетов является актуальным.

Целью работы является повышение достоверности акустико-эмиссионного контроля объектов сложной формы за счет применения методов численного моделирования распространения акустических волн.

Для достижения цели в ходе исследования решались следующие **задачи**:

1. Разработка методики расчета элементов акустического тракта преобразователя акустической эмиссии (ПАЭ).
2. Усовершенствование методики акустико-эмиссионного неразрушающего контроля боковых рам тележек грузового вагона за счет разработки алгоритма моделирования распространения акустических волн в линейных, плоских, объемных задачах.
3. Разработка способа относительной калибровки преобразователей акустической эмиссии.
4. Разработка устройства крепления преобразователя акустической эмиссии к объекту контроля, обеспечивающего повышение метрологической надежности и достоверности контроля.

Научная новизна диссертационной работы состоит в том, что:

1. Разработана численная модель преобразователя акустической эмиссии и получены закономерности его работы при приеме продольной и поперечной волн.
2. Разработана методика численного моделирования процесса распространения акустических волн в объектах контроля сложной формы с помощью метода конечных элементов.
3. Получены закономерности распределения полей напряжений и перемещений в боковой раме тележки грузового вагона, описывающие процесс распространения упругой акустической волны от источника акустической эмиссии, расположенного в буксовом проеме.

Практическая значимость работы:

Алгоритм моделирования процесса распространения акустических волн в объектах сложной формы позволяет прогнозировать динамический отклик объектов контроля. При этом геометрия объекта контроля может быть различной.

Создано устройство «Акустическая головка», нашедшее практическое применение в вагонных ремонтных депо АО «ВРК-1», и защищенное патентом РФ №152495. По сравнению с существующим способом установки преобразо-

вателей на объект контроля, предложенная акустическая головка обеспечивает стабильный прижим преобразователя к объекту контроля независимо от качества поверхности места установки преобразователя, повышение чувствительности контроля и отсутствие ударного воздействия на техническую керамику преобразователя, что повышает метрологическую надежность преобразователя акустической эмиссии.

Предложен способ относительной калибровки преобразователей акустической эмиссии, защищенный патентом РФ №2554320, позволяющий повысить достоверность результатов контроля и метрологически обеспечить преобразователь. Способ относительной калибровки преобразователей акустической эмиссии исключает влияние на результаты калибровки нестабильности характеристик источника акустического сигнала и амплитудно-частотных характеристик эталонного преобразователя. Способ позволяет проводить экспериментальное определение амплитудно-частотной характеристики калибруемого преобразователя в реальных условиях эксплуатации за счет получения необходимых экспериментальных данных амплитудного распределения сигналов в широком диапазоне частот.

Методы исследования:

При выполнении работы использованы численные методы моделирования процессов распространения акустических волн, экспериментальные методы, включающие испытания натуральных объектов контроля. Для обработки данных применялись статистические методы обработки результатов многократных измерений.

Основные научные положения, выносимые на защиту:

1. Методика расчета элементов приемного тракта преобразователя акустической эмиссии на основе метода конечных элементов с учетом особенностей прихода различного типа волн.
2. Метод повышения информационной надежности акустико-эмиссионного контроля боковых рам тележек грузовых вагонов на основе результатов конечно-элементного моделирования процесса распространения аку-

стических волн путем уточнения мест установки преобразователей при проведении контроля.

3. Метод повышения метрологической надежности результатов акустико-эмиссионного контроля с использованием сравнительного анализа численных результатов процесса распространения акустических волн в плоском теле с результатами физического эксперимента при имитационном нагружении металлической пластины при акустико-эмиссионных испытаниях.

4. Способ относительной калибровки преобразователя акустической эмиссии, позволяющий оценивать амплитудно-частотную характеристику, одну из основных характеристик преобразователя акустической эмиссии. Способ позволяет улучшить метрологическое обеспечение средств контроля и включает в себя применение устройства генерации непрерывных сигналов акустической эмиссии трения.

5. Устройство «Акустическая головка», позволяющее улучшить акустический контакт преобразователя акустической эмиссии и объекта контроля за счет возможности самоустановки на объекте. Устройство позволяет увеличить долговечность преобразователя, повысить точность контроля при определении координат источника акустической эмиссии.

Объектом исследования являются акустические волны при проведении акустико-эмиссионного контроля литых деталей тележки грузового вагона.

Предметом исследования являются процессы распространения, огибания и прохождения акустическими волнами геометрических и физических неоднородностей в твердом теле.

Степень достоверности результатов, полученных в ходе исследования подтверждается согласованностью результатов, получаемых разными методами исследования, высокой корреляцией теоретических расчетов, численных исследований и результатов практических испытаний, использованием поверенных и калиброванных средств измерений при натурных испытаниях.

Личный вклад автора

Разработка численных моделей, решение тестовых задач, проведение анализа. Автор принимала непосредственное участие в испытаниях устройства «Акустическая головка», в обработке экспериментальных данных при разработке способа относительной калибровки преобразователей акустической эмиссии.

Апробация работы

Результаты проводимых исследований были доложены на следующих конференциях: V Российская научно-техническая конференция «Ресурс и диагностика материалов и конструкций», Екатеринбург (ИМАШ УрО РАН), 25-28 апреля 2011 г., I Всероссийская с международным участием научно-практическая конференция по инновациям в неразрушающем контроле SibTest, 25-29 июля 2011 г., г. Томск (ТПУ), II Всероссийская с международным участием научно-практическая конференция по инновациям в неразрушающем контроле SibTest 12-17 августа 2013 г., г.Томск (ТПУ), 3-я Всероссийская конференция «Проблемы оптимального проектирования сооружений», 15-17 апреля 2014 г., г. Новосибирск (Сибстрин), VIII Российская научно-техническая конференция «Механика, ресурс и диагностика материалов и конструкций», 26-30 мая 2014г., г. Екатеринбург (ИМАШ УрО РАН), XII Международная научно-практическая конференция студентов, аспирантов и молодых ученых «Молодежь и современные информационные технологии», 11-14 ноября 2014г., г.Томск (ТПУ), V Всероссийская научно-практическая конференция студентов и молодых ученых «Неразрушающий контроль: электронное приборостроение, технологии, безопасность», 25-29 мая 2015г., г.Томск (ТПУ), III Всероссийская с международным участием научно-практическая конференция по инновациям в неразрушающем контроле SibTest, г. Томск (ТПУ), 2015 г.

Публикации

По материалам выполненных исследований опубликовано 15 работ, в том числе 4 в рецензируемых научных изданиях, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание ученой степени доктора наук, таких как:

«Вестник ТГАСУ», «Дефектоскопия» («Russian Journal of Nondestructive Testing»), «Контроль. Диагностика», «Journal of Physics: Conference Series», получено два патента РФ, список приведен ниже.

Структура диссертации

Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, заключения, списка сокращений и условных обозначений, списка литературы, включающего 150 наименований, трех приложений. Общий объем работы составляет 149 страниц машинописного текста, включает 52 рисунка, 18 таблиц.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы работы, сформулированы цель и задачи исследования, охарактеризована новизна и практическая значимость полученных в ходе выполнения диссертационной работы результатов, перечислены основные положения, выносимые на защиту, указаны основные конференции, на которых пройдена апробация работы.

В первом разделе проводится краткий обзор экспериментальных и численных методов исследования распространения акустико-эмиссионных волн в различных объектах неразрушающего контроля. Значительный вклад в развитие этих методов внесли отечественные и зарубежные исследователи: В. А. Акопян, Н. П. Алешин, А. Р. Баев, С. М. Балабаев, В. А. Бархатов, С. Г. Бахвалов, В. Т. Беликов, М. Е. Белкин, А. В. Белоконь, С. А. Бехер, М. В. Богуш, Г. А. Буденков, С. И. Буйло, М. Г. Васильев, А. О. Ватульян, С. И. Герасимов, Э. С. Горкунов, М. Гримс, В. Н. Данилов, Н. Ф. Ивина, Л. В. Илларионова, С. И. Кабанов, В. К. Качанов, В. В. Ключев, А. Г. Кузьменко, В. К. Кулешов, Б. М. Лапшин, В. В. Муравьев, О. В. Муравьева, В. А. Наседкин, А. Л. Овчинников, С. В. Панин, А. В. Попов, А. Б. Ринкевич, Е. В. Рожков, Р. А. Саврай, А. Н. Серьезнов, С. В. Смирнов, А. Н. Соловьев, Л. Н. Степанова, С. Н. Шевцов, А. М. Ширяев, В. М. Шихман, А. Г. Хакимов, A. Carpinteri, A.C.H. Cheng, M. A. Hamstad, M. Hirsekorn, K. F. Graff,

M. A. Hamstad, P. Hora, G. R. S. Markus, Hu Mingshun, A. Mostafapour, F. Schubert, M. Spies, A. M. Zelenyak, и др.

Рассмотрено современное состояние технической диагностики с использованием метода акустической эмиссии. Приводится краткий обзор методов исследования процесса распространения акустических волн в объектах неразрушающего контроля. Все отмеченные выше методы анализируются по следующим параметрам: основные положения, лежащие в их основе, чувствительность, диапазон и точность измерений, используемые приемы, алгоритмы, научная новизна полученных результатов, область применения, основные преимущества и недостатки.

Выделены три основных этапа, на каждом из которых применяются численные подходы: моделирование источника сигнала, распространения акустических волн и приема акустического сигнала. В работах авторов рассматривается моделирование источников с помощью сосредоточенной силы в виде импульса малой длительности, что было реализовано в дальнейших исследованиях автора. Рассмотрены варианты моделирования поверхностного и подповерхностного источника сигнала акустической эмиссии.

Проанализированы работы, в которых рассмотрен анализ процесса излома грифеля (источник Су-Нильсена) как источника акустико-эмиссионного сигнала и возникающей при изломе волны упругой деформации. Анализируется влияние длины свободного конца, диаметра, угла наклона стержня при изломе на возникающие силы.

Рассмотрены результаты экспериментальных и аналитических исследований преобразователей акустической эмиссии, моделирование прохождения акустических волн через приемный тракт преобразователя как неоднородную многослойную среду. В конце первого раздела сформулированы цель и задачи диссертационной работы.

Во втором разделе обсуждаются методы расчета ПАЭ. Проведено моделирование процесса прихода акустических волн на чувствительный элемент ПАЭ. В пьезоэлектрической пластине в качестве электродов выступают верх-

няя и нижняя грани, с которых снимается разность потенциалов, этот сигнал идет по каналу в систему обработки сигналов. В работе анализируется модель отдельной пластины, получен отклик пластины на воздействие продольной и поперечной волн при равных начальных и граничных условиях. Установлено, что при приходе на пьезопластину продольной моды колебаний основной деформацией пластины является «растяжение-сжатие». При приходе на пластину поперечной волны колебания пластины имеют такую моду, при которой суммарные перемещения, напрямую влияющие на уровень сигнала, минимальные.

При анализе работы преобразователя как многослойной структуры использовано только моделирование продольной волны. В Модели (см. рисунок 1) преобразователя учтены основные конструктивные элементы: пьезоэлектрический элемент, техническая керамика, и демпфирующий элемент.

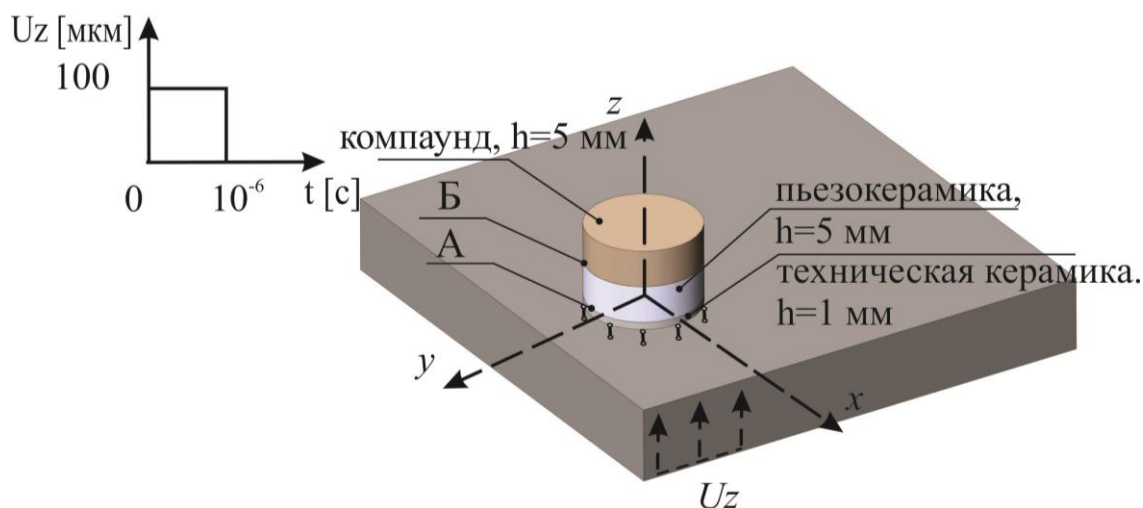


Рисунок 1 Модель трехслойного преобразователя для расчета

Материал слоев и граничные условия представлены на рисунке 1: по кромке грани А введен запрет перемещений по оси z , в двух узлах кромки обеспечен запрет перемещений по оси x и поворотов относительно осей x , y , z . В каждом узле грани А приложено перемещение по оси z (по нормали к поверхности пластины), по модулю равное 100 мкм в форме импульса длительностью $1 \cdot 10^{-6}$ с. Это воздействие моделирует приход на пьезопластину продольной акустической волны. Расчет Модели проводился в программном комплексе COSMOS/M в модуле нелинейного динамического расчета. В рамках задачи анализируется компонента U_z перемещения узлов, принадлежащих грани Б, а также

разность перемещений граней А и Б, которая напрямую влияет на величину выходного напряжения преобразователя.

Результаты расчета в виде распределения перемещений U_z Модели для разных моментов времени приведены на рисунке 2 а–и. В момент времени $2,5 \cdot 10^{-7}$ с фронт волны начинает распространяться от грани А, проходит слой технической керамики. В моменты времени $1 \cdot 10^{-6}$ с и $1,25 \cdot 10^{-6}$ с фронт волны доходит до верхней грани пьезокерамики Б, появляется фронт отраженных волн. В моменты времени $1,5 \cdot 10^{-6}$ с, $2,0 \cdot 10^{-6}$ с наблюдаются максимальные перемещения грани Б, волна частично проходит в слой компаунда и начинает распространяться в нем с очень малой скоростью. Основная же волна отражается от грани Б и идет в обратном направлении, что можно наблюдать на рисунках 2 (е–и). В момент времени $3,5 \cdot 10^{-6}$ с пьезопластина находится в состоянии растяжения. К моменту времени $5,0 \cdot 10^{-6}$ с в результате переотражений наблюдаются две зоны растяжения и сжатия в верхней и нижней зонах Модели.

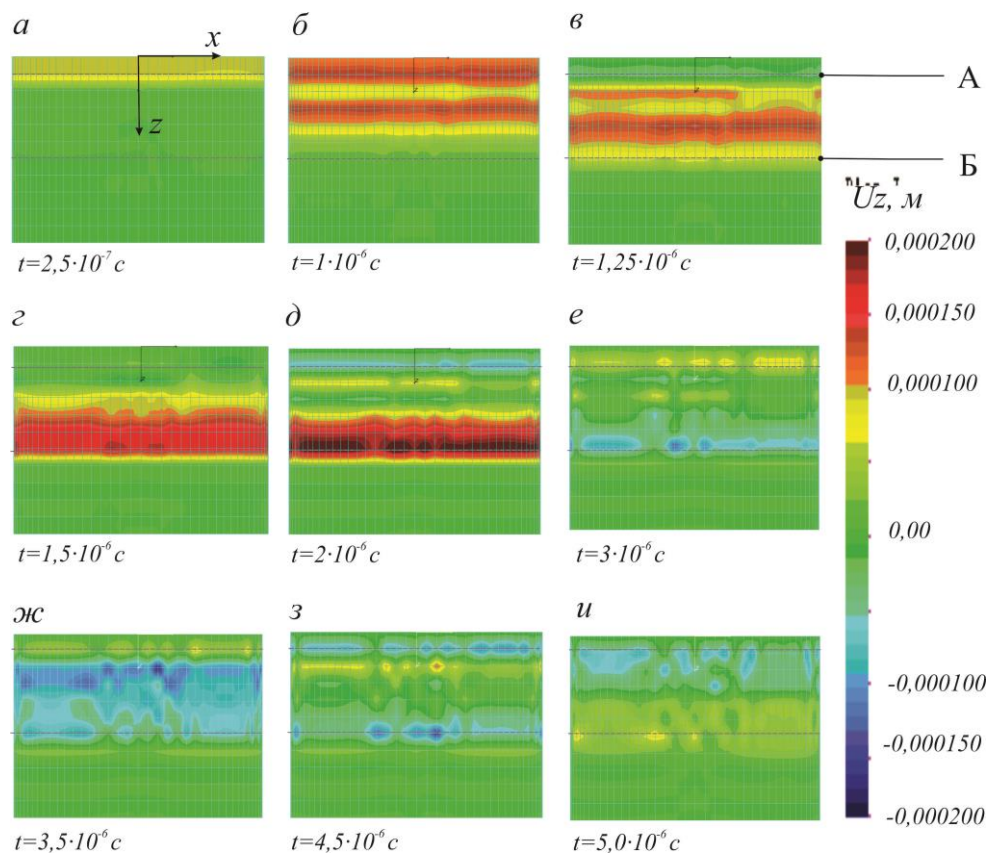


Рисунок 2 – Поля перемещений U_z для многослойной Модели в разные моменты времени (приход продольной волны)

Для оценки уровня сигнала взята разность перемещений ΔU_z верхней и нижней граней в разные моменты времени. Суммарные перемещения $\Delta U_t^\Sigma = \Sigma \Delta U_z$ узлов верхней и нижней граней многослойной Модели в разные моменты времени представлены в таблице 1.

Таблица 1. Суммарные перемещения ΔU_t^Σ , м многослойной Модели

$t, 10^{-6} \text{ с}$	$\Delta U_t^\Sigma, \text{ м}$	$t, 10^{-6} \text{ с}$	$\Delta U_t^\Sigma, \text{ м}$
0,5	$-4,71 \cdot 10^{-2}$	1,50	$6,07 \cdot 10^{-2}$
1,00	$-5,07 \cdot 10^{-2}$	1,75	$7,52 \cdot 10^{-2}$
1,25	$3,42 \cdot 10^{-2}$		

В третьем разделе представлены алгоритмы моделирования процесса распространения акустических волн в линейных, плоских и объемных объектах неразрушающего контроля с различной геометрией и свойствами.

Для Модели 1 длиной 10 м рассмотрено распространение акустической волны от свободного конца, где приложен короткий импульс силы, до жесткой заделки, и ее отражение от жесткой заделки. Проведен анализ перемещений U_x узлов тестовой модели (рисунок 3). Период следования волн удовлетворительно согласуется с теоретическим расчетом, прослеживается процесс их отражения от края модели

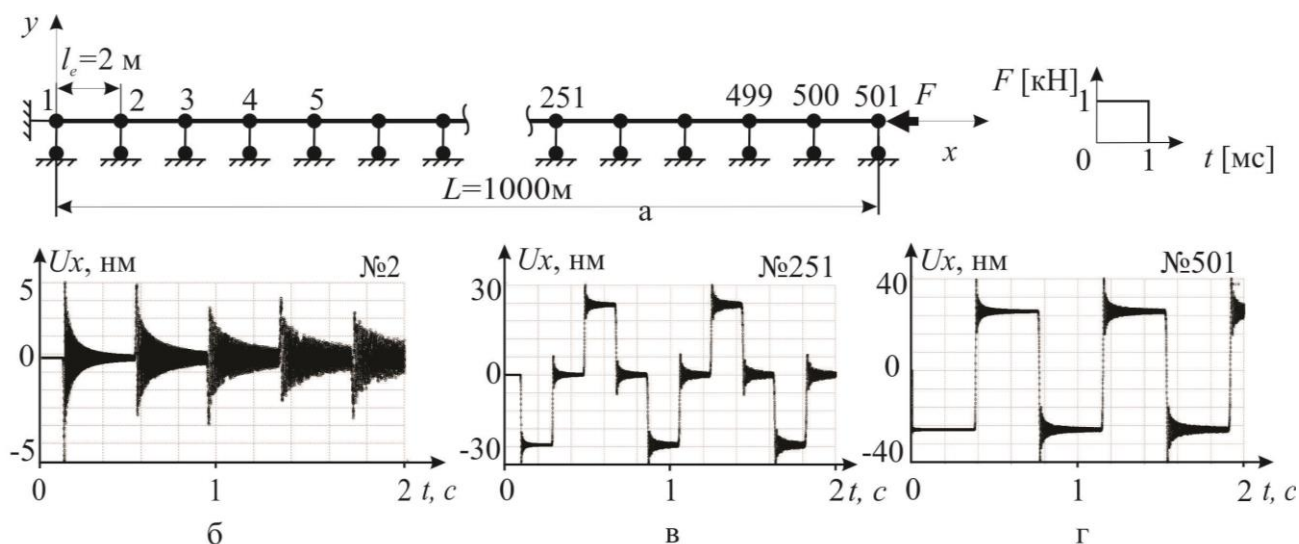


Рисунок 3 - Отклик линейной Модели 1 на импульсное воздействие
а – граничные условия для модели, б – перемещение U_x в узле №2,
в - перемещение U_x в узле №251, г - перемещение U_x в узле №501

Время прихода отраженной волны составляет $t=0,4$ с (рисунок 3 г), в этот момент времени крайний узел 501 возвращается в первоначальное (нулевое) положение и начинает отклоняться в обратном направлении. В работе получены результаты моделирования процесса прохождения акустических волн в линейных моделях, которые учитывают собственный вес. Исследовано влияние пространственной дискретизации на точность конечно-элементного расчета. Для этой цели созданы тестовые модели с одинаковыми начальными и граничными условиями, но разной частотой сетки от $\lambda/3$ до $\lambda/30$, где λ – длина волны.

В плоских объектах численное моделирование процессов распространения волны проведено с разной пространственной дискретизацией, частота прикладываемых импульсов варьировалась от 1 кГц до 100 кГц. Рассматривалось воздействие импульсными распределенной нагрузкой и сосредоточенной силой. Точечное приложение силы F привело к возникновению сферической волны в моделях. Рассмотрены особенности продвижения волнового фронта при различных вариантах нагружения Моделей.

В большинстве случаев объекты неразрушающего представляют собой тела с неоднородностями структуры, формы, состава. Для обеспечения решения задач распространения упругих волн в неоднородных телах с концентраторами, была рассмотрена Модель 11 с геометрическим концентратором в виде отверстия. Ее граничные условия и нагружение представлены на рисунке 4. Получены результаты прохождения и сложения волн вблизи концентратора.

На рисунке 4 б, в представлены напряжения σ_x в моменты времени 0,05 мс и 0,15 мс соответственно. Волновой импульс от обеих граней доходит до четверти модели за 0,05 мс (рисунок 4 б). По теоретическим подсчетам продольная волна идет с известной скоростью 5200 м/с и проходит $\frac{1}{4}$ модели (0,25 м) за время, равное 0,048 мс. Фронт волны проходит $\frac{3}{4}$ модели и огибает концентратор за время 0,15 мс (рисунок 4 в). В середине модели происходит сложение волн, вблизи отверстия коэффициент концентрации достигает трех, что удовлетворительно согласуется с теоретическим решением задачи Кирша.

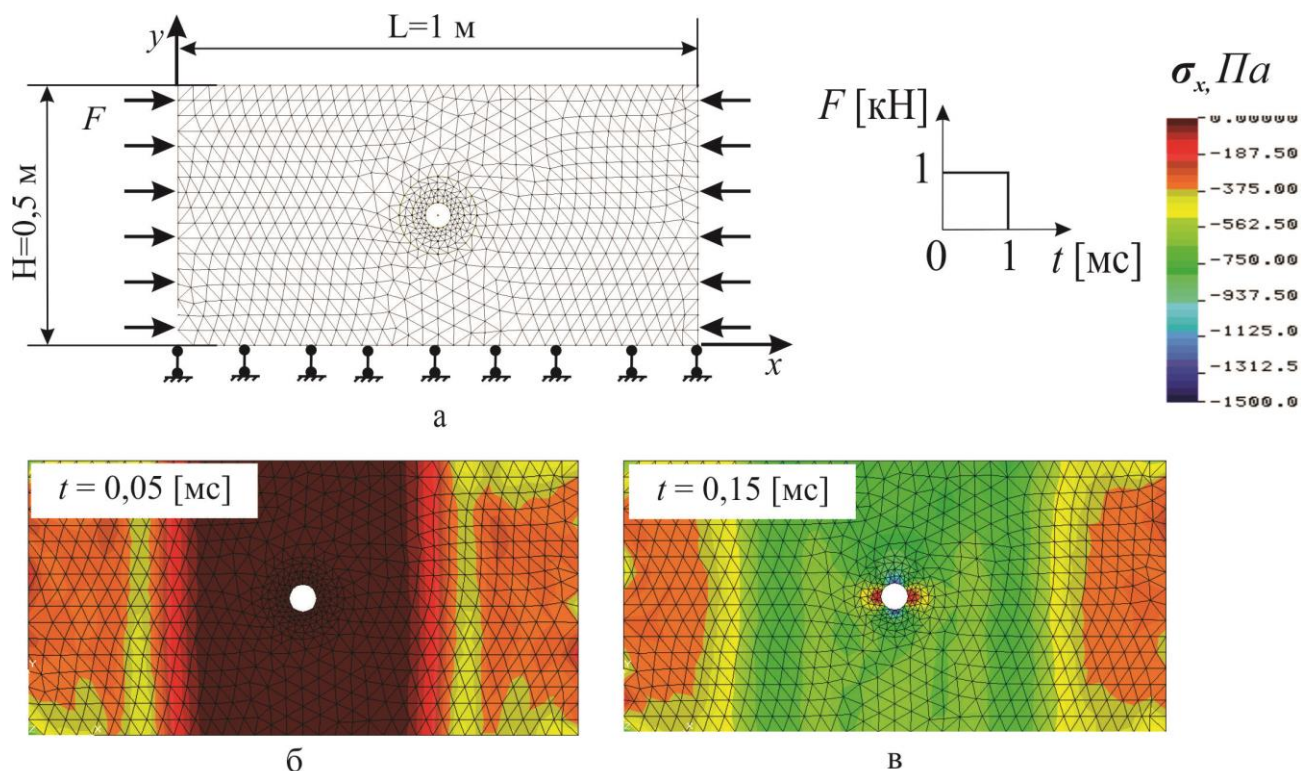


Рисунок 4 – Распространение волнового импульса в Модели 11

Кроме несплошностей типа пор или раковин, наиболее опасными для объектов, работающих в условиях циклических напряжений, являются трещины. Для исследования объектов с концентраторами в виде трещин были созданы численные Модели 12 и 13, в которых процесс продвижения трещины был смоделирован приложением силы в узле в вершине трещины в виде импульса. По результатам нескольких численных экспериментов установлено, что конечная форма трещины и ее геометрические размеры на больших расстояниях от нее не оказывают влияния на фронт акустической волны.

В работе рассмотрен процесс распространения акустической волны через неоднородную модель с зонами с различными физико-механическими параметрами. Тестовая модель состояла из двух слоев – стали и меди. Расчет показал, что численные результаты прохождения волны через границу раздела сред (преломления) согласуются с известными законами геометрической акустики. Получены результаты моделирования процессов распространения волн в объемных объектах контроля и сравнение этих результатов с известным аналитическим решением распространения волны в упругом полупространстве.

Полученные решения моделирования акустико-эмиссионных сигналов в пластинах толщиной 6-8 мм сравнивались с экспериментальными данными.

Эксперимент проводился с пластиной размерами $1,0 \times 1,0 \times 0,008$ м, изготовленной из стали 20. Хрупкий излом грифеля в установке для излома генерировал АЭ сигнал. Датчики Д0, Д1, Д2, Д3, регистрировали смещения U_z точек поверхности пластины (по нормали к свободной поверхности). На графиках рисунка 5 а представлены зависимости от времени перемещений U_z для каждого из узлов численной модели, в которых на реальном объекте установлены преобразователи акустической эмиссии.

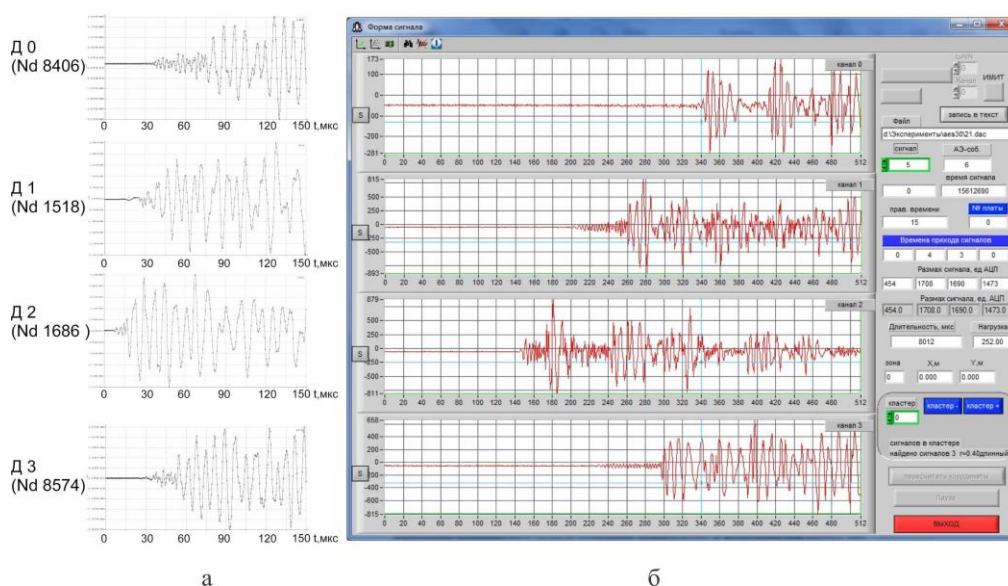


Рисунок 5 – Акустико-эмиссионные сигналы, полученные при численном и физическом экспериментах

а – численные результаты перемещения узлов
(координаты аналогичны местам установки датчиков);
б – сигналы, зарегистрированные системой СЦАД-16.02

Первым по времени акустический сигнал приходит в узел 1686 модели (на этом месте находится датчик Д2), далее в узел 1518 (датчик Д1), после него волна приходит в узел 8574 (датчик Д3), далее – в узел 8406 (датчик Д0) численной модели. Абсолютное время прихода волны в узлы расположения преобразователей соответствует аналитическому решению. На рисунке 5 б показаны сигналы, зарегистрированные системой цифровой диагностической СЦАД-16.02. По результатам исследований установлено, что результаты физического эксперимента и численного моделирования совпадают.

В четвертом разделе представлены результаты численного моделирования процесса распространения акустических волн в боковой раме тележки грузового вагона. Результаты расчета созданной модели представлены на рисунках 6 а, б, в, г, д, е. На рисунке 7 а представлена схема расстановки ПАЭ согласно нормативным требованиям, стрелками показаны нагрузки, развиваемые на испытательном стенде. На рисунке 7 б показано распределение перемещений U_x во фронтальной плоскости YZ в боковой раме в момент времени $t=0,001$ с, когда волна многократно отразилась от краев детали и процесс можно считать установившимся. Результаты расчета показали, что ПАЭ №9(12), №10(11), №13(16) установлены на боковую раму в зонах, где среднее распределение перемещений по нормали U_x , стремится к нулю.

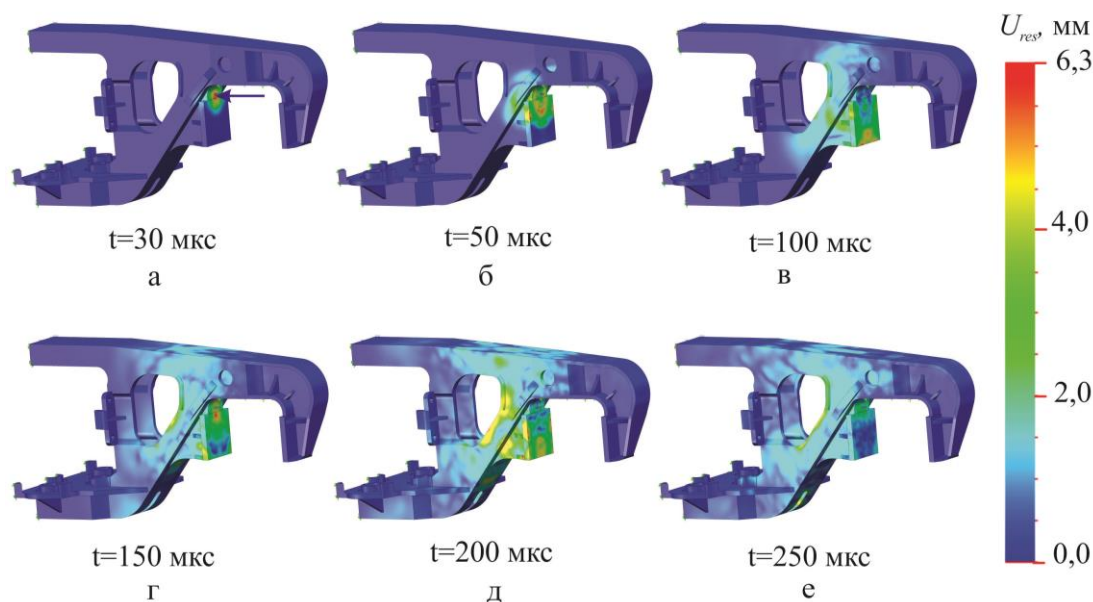


Рисунок 6 – Процесс распространения волны в боковой раме тележки грузового вагона при конечно-элементном расчете (поля результирующих перемещений U_{res})

В ходе работы даны рекомендации по перестановке ПАЭ в зоны с максимальными значениями нормальных перемещений поверхности. Для подтверждения выданных рекомендаций, на боковую раму в натурном эксперименте было установлено восемь ПАЭ. В первом эксперименте ПАЭ были установлены согласно технологической инструкции, во втором эксперименте - смещены в рекомендуемые области, источник АЭ располагался в буксовом проеме в зоне радиуса R55, как и в численной модели.

В таблице 2 приведены экспериментальные данные для 20 серий изломов первого и второго эксперимента соответственно. В столбцах 2, 4, 6, 8, 10, 12, 14, 16 выделены средние размахи по каждому из восьми каналов для всех серий первого эксперимента (без смещения) ПАЭ.

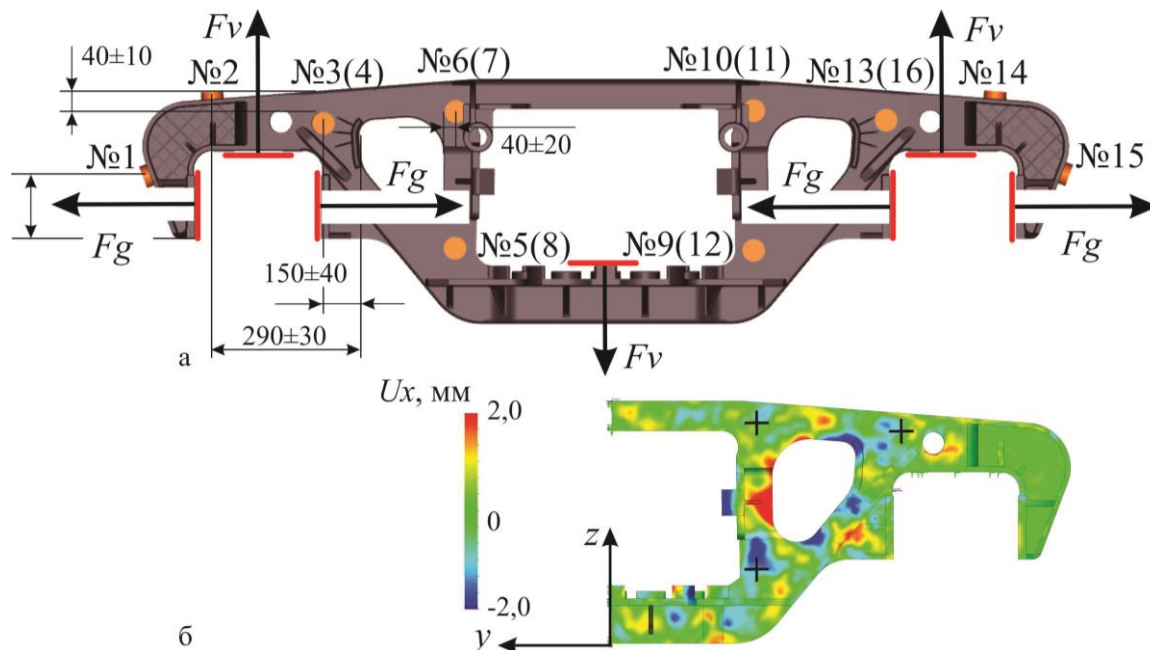


Рисунок 7 – Численные результаты, полученные в программной среде SolidWorks, а - схема расстановки преобразователей с номерами и схема нагружения, б – распределение нормальной компоненты перемещений U_x во фронтальной плоскости в момент времени 0,001 с

В столбцах 3, 5, 7, 9, 11, 13, 15, 17 выделены средние размахи по каждому из восьми каналов для всех серий второго эксперимента (со смещением). Приведен коэффициент K_r , показывающий, во сколько раз увеличивается среднее значение размаха по каждому из каналов при перестановке преобразователей согласно рекомендациям численного моделирования в рекомендуемые области.

Таблица 2 – Размахи сигналов на восьми каналах при первом и втором эксперименте

№ излома грифеля	0 канал, ед. АЦП		1 канал, ед. АЦП		2 канал, ед. АЦП		3 канал, ед. АЦП		4 канал, ед. АЦП		5 канал, ед. АЦП		6 канал, ед. АЦП		7 канал, ед. АЦП	
	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17
1	3807	4007	2860	3985	1337	3924	3973	3992	1610	3789	1587	4064	414	3877	1171	4069
2	3999	3995	3457	3979	2728	3269	3999	3986	1775	2827	2056	3280	528	2187	1569	3118
3	3985	4012	3490	3989	2164	3913	3984	3988	1771	4064	2113	4062	451	3404	1651	4062
..	..	..	..	..	..	..	..	..	..	..	..	..	..	..	..	..
20	3804	4004	3963	3984	1838	3825	3632	3990	1571	2093	1674	4055	464	2733	1405	3266
Среднее	3857,9	3931,5	3680,5	3969,8	2505,0	3592,7	3889,3	3967,8	1942,2	2911,8	2214,5	3621,5	659,5	2618,3	1864,6	3474,9
K_r	1,02		1,08		1,43		1,02		1,50		1,64		3,97		1,86	

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Основные научные выводы и практические рекомендации заключаются в следующем:

1. Получены результаты численного моделирования ПАЭ при приходе на него двух типов волн – продольной и поперечной.
2. Предложен и реализован на тестовых моделях алгоритм прохождения акустических волн в одномерных, двумерных, трехмерных моделях неразрушающего контроля. Получены результаты моделирования распространения акустико-эмиссионных волн в моделях с концентраторами и моделями трещин.
3. Получены сравнительные результаты аналитического и численного расчета для объемной модели.
4. Получены результаты распространения акустико-эмиссионной волны в боковой раме тележки грузового вагона, с использованием которых даны рекомендации по оптимальному расположению ПАЭ при проведении АЭ контроля. Получено экспериментальное подтверждение данных рекомендаций.

Выполненные исследования позволили значительно расширить область применения численных методов в практике неразрушающего контроля. Использование данных результатов и рекомендаций позволили повысить точность и достоверность проведения АЭ контроля за счет улучшения акустического контакта ПАЭ и объекта контроля и оптимизации их расположения на объекте.

Из вышеизложенного следует, что исследование распространения акустических волн в твердых телах с геометрическими неоднородностями, неоднородностями свойств и структуры самого материала является актуальным, при этом разработанные методы численного исследования позволяют повысить точность и достоверность результатов неразрушающего контроля.

Список работ, опубликованных автором по теме диссертации в рецензируемых научных изданиях из перечня ВАК и список патентов:

1. Сыч, Т.В. Моделирование распространения акустических волн методом конечных элементов / Т.В. Сыч, С.И. Герасимов, В.К. Кулешов // Дефектоскопия. - 2012. - № 3. - С. 3-9.

2. Сыч, Т.В. Численное моделирование акустической эмиссии при исследовании элементов мостовых конструкций / Т.В. Сыч, С.П. Васильев, С.А. Бехер, С.И. Герасимов // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. - 2012. - № 2. - С. 212-221.

3. Сыч, Т.В. Моделирование распространения ультразвуковой волны через сварной шов / Сыч Т.В., Герасимов С.И., Кулешов В.К. // Контроль. Диагностика. – 2013. – № 13. – С. 203-206.

4. Gerasimov, S. Application of Finite Elements Method for Improvement of Acoustic Emission Testing / S. Gerasimov, T. Sych and V. Kuleshov // Journal of Physics: Conference Series. – Vol. 671, N1. – 2016. – P. 012017.

Патенты РФ:

5. Пат. 152495 Российская Федерация, МПК G01N 29/04 (2006.01) Акустическая головка / Сыч Т.В., Герасимов С.И., Бехер С.А.; заявитель и патентообладатель ФГБОУ ВПО Сибирск. гос. универ. путей сообщения. - №2014150113/28; заявл. 10.12.2014 ; опубл. 10.06.2015 Бюл. №16. – 1 с.: ил.

6. Пат. 2 554 320 Российская Федерация, МПК G01N 29/30 (2006.01) Способ относительной калибровки преобразователей акустической эмиссии / Сыч Т.В, Бехер С.А., Бобров А. Л.; заявитель и патентообладатель ФГБОУ ВПО Сибирск. гос. универ. путей сообщения. - №2014101589/28; заявл. 20.01.2014 ; опубл. 27.06.2015 Бюл. №18. – 7 с.: ил.

Список работ в иных печатных изданиях:

7. Сыч, Т.В. Математическое моделирование акустических волн в пластине и в объемном теле сложной геометрической формы/Сыч Т.В., Герасимов С.И.//В сб.: Молодежь и современные информационные технологии. - Томск, 2014. - С. 170-171.

8. Сыч, Т.В. Численное моделирование сигналов акустической эмиссии/Сыч Т.В., Герасимов С.И.//Сб. мат. «Наука и молодежь XXI века». – Новосибирск, 2011. – С. 78-80.

9. Сыч, Т.В. Моделирование распространения акустических волн методом конечных элементов/Т.В. Сыч, С.И. Герасимов, В.К. Кулешов//Сб. трудов «Инновации в неразрушающем контроле SibTest». - ТПУ. - 2011. - С. 233-235.

10. Сыч, Т.В. Моделирование распространения упругих волн в твердых телах методом конечных элементов/Сыч Т.В., Герасимов С.И.//Мат. конференции «МНСК». – Новосибирск. - 2011. - С. 20.

11. Сыч, Т.В. Моделирование сигналов акустической эмиссии с использованием программного пакета COSMOS/М/Сыч Т.В., Герасимов С.И.//Сб. мат. конференции «РДМК-2011». – Екатеринбург. - 2011. - С. 47.

12. Сыч, Т.В. Численное моделирование волновых процессов на границе раздела сред/Т.В. Сыч, С.И. Герасимов; под ред. В.А. Клименова//Сб. трудов «Инновации в неразрушающем контроле Sib Test». - ТПУ, 2013.–С.46-53.

13. Герасимов, С.И. Численные методы расчета и оптимизации процессов, протекающих при забивке стержней во время подкрепления вертикальных откосов/С.И. Герасимов, Т.В. Сыч//Сб. докладов Проблемы оптимального проектирования сооружений. Новосибирск, 2014. - С. 84-91.

14. Сыч, Т.В. Экспериментально-расчетное изучение распространения акустических волн от источника Су-Нильсена/Т.В. Сыч, С.И. Герасимов//Тезисы VIII Российской научно-технической конференции «РДМК-2014». – Екатеринбург, 2014. - С. 112.

15. Сыч, Т.В. Применение метода конечных элементов для уточнения схемы расстановки преобразователей при акустико-эмиссионном контроле/Т.В. Сыч, С.И. Герасимов// В сб.: Неразрушающий контроль: электронное приборостроение, технологии, безопасность. – ТПУ, 2015. - С. 181-184.

Сыч Татьяна Викторовна
**СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ СУЩЕСТВУЮЩЕЙ ТЕХНОЛОГИИ
АКУСТИКО-ЭМИССИОННОГО КОНТРОЛЯ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ КОНЕЧНО-
ЭЛЕМЕНТНОГО АНАЛИЗА АКУСТИЧЕСКОГО ТРАКТА**
АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

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

Подписано в печать «13» 09 2016 г.

1,5 печ. л. Тираж 100 экз. заказ №3021

Издательство ФГБОУ ВО «Сибирский государственный университет путей сообщения»
630049, Новосибирск, ул. Дуси Ковальчук, 191
