Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
«Сибирский государственный университет путей сообщения»

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

Диссертация на соискание ученой степени кандидата
технических наук

Научный руководитель:
доктор технических наук, профессор
Герасимов Сергей Иванович

Новосибирск – 2016

Оглавление

Введение …….. **4**

1 Анализ существующих методов моделирования процесса распространения акустических волн в объектах…….. **10**

1.1 Анализ существующих методов исследования различных объектов неразрушающего контроля …… **10**

1.2 Моделирование источника акустико-эмиссионного сигнала ……..... **14**

1.3 Моделирование процесса распространения упругих волн деформации **19**

1.4 Моделирование акустических преобразователей …… **26**

1.5 Моделирование границы раздела сред ……. **29**

1.6 Выводы по разделу 1 ……..……. **31**

2 Совершенствование методов расчета элементов преобразователей акустической эмиссии …… **33**

2.1 Расчет пьезоэлектрической керамики ……..……. **34**

2.2 Расчет преобразователя как многослойной структуры……. **41**

2.3 Разработка конструкции акустической головки для повышения надежности и точности акустико-эмиссионного контроля …… **47**

2.4 Выводы по разделу 2……..... **50**

3 Численное моделирование процессов распространения волн в тестовых задачах …….. **52**

3.1 Численное моделирование процессов распространения волны в линейных объектах …… **53**

3.2 Численное моделирование процессов распространения волны в плоских объектах …… **63**

3.3 Численное моделирование процессов преломления волн на границе раздела двух сред …… **78**

3.4 Численное моделирование процесса распространения волны в объемных объектах ……..…… **84**

3.5 Расчетно-экспериментальное моделирование процессов распространения АЭ сигнала в плоских объектах от источника Су-Нильсена …….. **87**

3.6 Выводы по разделу 3……..... **101**

4 Повышение информационной надежности акустико-эмиссионного неразрушающего контроля объектов железнодорожного транспорта..…… **102**

4.1 Анализ существующей технологии неразрушающего контроля литых деталей тележки грузового вагона …… **102**

4.2 Моделирование процесса распространения волны в боковой раме тележки грузового вагона …….. **105**

4.3 Экспериментальные исследования распространения волн при испытаниях боковой рамы тележки грузового вагона …… **117**

4.4 Алгоритм калибровки преобразователей при проведении акустико-эмиссионного контроля …… **124**

4.5 Выводы по разделу 4 …….. **128**

Заключение …….. **130**

Список сокращений и условных обозначений……. **132**

Список литературы …… **133**

Приложение А. Патент на полезную модель «Акустическая головка» ….. **147**

Приложение Б. Патент на изобретение «Способ относительной калибровки преобразователей акустической эмиссии»…….. **148**

Приложение В. Акт об использовании результатов диссертационной работы ……..…….. **149**

ВВЕДЕНИЕ

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 состоит в следующем:

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 преобразователей 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 натурных 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 акустических 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.

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.

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 2011г., г. Томск (ТПУ), II Всероссийская с международным участием научно-практическая конференция по инновациям в неразрушающем контроле SibTest 12-17 августа 2013г., 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 2014 г., г. Екатеринбург (ИМАШ УрО РАН), XII Международная научно-практическая конференция студентов, аспирантов и молодых ученых «Молодежь и современные информационные технологии», 11-14 ноября 2014 г., г. Томск (ТПУ), V Всероссийская научно-практическая конференция студентов и молодых ученых «Неразрушающий контроль: электронное приборостроение, технологии, безопасность», 25-29 мая 2015 г., г. Томск (ТПУ), III Всероссийская с международным участием научно-практическая конференция по инновациям в неразрушающем контроле SibTest, г. Томск (ТПУ), 2015г.

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.

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.

1 АНАЛИЗ СУЩЕСТВУЮЩИХ МЕТОДОВ МОДЕЛИРОВАНИЯ ПРОЦЕССА РАСПРОСТРАНЕНИЯ АКУСТИЧЕСКИХ ВОЛН В ОБЪЕКТАХ

1.1 Анализ существующих методов исследования различных объектов неразрушающего контроля

Контроль неразрушающими методами находит все более широкое применение в различных областях науки и техники [2, 3, 4, 10, 17, 30, 96, 100, 107, 149]. В настоящее время в РФ существует большое количество производственных и технических объектов, чей ресурс приближается к предельно допустимому. Проблема продления ресурса стала чрезвычайно актуальной в начале 2000-х годов, но не потеряла своей актуальности и в настоящее время [9]. Закупка нового оборудования взамен исчерпавшего свой ресурс, как правило, экономически затруднительна, поэтому в случае продления срока эксплуатации объектов единственными методами контроля являются такие, которые не нарушают пригодности объекта к использованию, то есть неразрушающие методы контроля.

Ультразвуковые методы акустического неразрушающего контроля (НК) успешно используются при испытаниях элементов различных конструкций. На железнодорожном транспорте это рельсовые плети, стрелочные переводы, детали и узлы грузовых вагонов [21, 34, 53, 65]. Ультразвуковые методы относятся к активным методам НК [32]. Однако область применения таких методов ограничивается относительно простыми по геометрии элементами, либо небольшими зонами контроля. Это связано, во-первых, с необходимостью сканирования объекта контроля (ОК), во-вторых, с необходимостью обеспечения малой шероховатости поверхности в зоне контакта преобразователя с ОК. Пассивные методы контроля могут использоваться для сложных с геометрической точки зрения объектов [57, 58, 100, 101, 104, 128, 150]. Метод акустической эмиссии (АЭ) как пассивный метод акустического контроля имеет меньше ограничений, связанных с размерами и формой ОК, шероховатостью

поверхности, поэтому применяется при испытаниях объектов, имеющих сложную геометрию [51, 56, 72, 76, 124, 137]. В частности метод АЭ широко используется для таких деталей грузовых вагонов, как боковая рама и надрессорная балка. Одним из главных преимуществ АЭ метода является возможность выявления развивающихся дефектов, трещин, находящихся в стадии роста. Такие трещины под воздействием внешних нагрузок начинают «звучать». Сигналы от данных трещин поступают на акустическую приемную антенну, и регистрируются акустико-эмиссионной системой. В РФ используется как зарубежная, так и отечественная акустико-эмиссионная аппаратура [2, 3, 38, 70]. Методы, применяемые для определения координат источников АЭ и их ограничения, описаны в работах [66, 98, 121] для объектов протяженных в [51, 101, 117, 132]. АЭ контроль утечки является одним из разновидностей АЭ контроля и используется в нефтяной и газовой промышленности. Обнаружению утечек в нефтяных и газовых трубопроводах уделяется большое внимание, так как утечки могут привести к значительным экологическим и материальным потерям.

При локализации источника в нефтегазовых трубопроводах регистрируется непрерывный АЭ сигнал, так называемая непрерывная АЭ утечки через сквозной дефект. Утечка в трубопроводах высокого давления создает волну напряжений, вызванную локальным выбросом энергии. По этой проблеме в [132] описан эксперимент, когда на стальные трубы согласно американскому стандарту ASTM 106/99 устанавливалась антенна датчиков. Труба имела длину 6 м, толщину стенки 7,35 мм и внешний диаметр 169 мм, давление создавалось нагнетанием воздуха с помощью компрессора. Источники АЭ утечки имели диаметр 0,6 мм и 1 мм. Для регистрации АЭ сигналов использовались два датчика, установленные на расстоянии 20 и 100 см от источника. Для регистрации результатов использована АЭ система с рабочей частотой 100 и 750 кГц. Частота регистрируемого сигнала составила около 400 кГц. Для анализа сигналов было применено быстрое преобразование Фурье. Погрешность результатов составила менее 6%.

В общем случае акустическая волна содержит множество мод, распространяющихся через ОК с разными скоростями [59, 68]. Акустический

преобразователь регистрирует суперпозицию всех этих мод. В силу поляризации пьезоэлектрического элемента, преобразователи акустической эмиссии (ПАЭ) регистрируют преимущественно продольные колебания, направленные по нормали к контролируемой поверхности.

Акустические волны взаимодействуют с дефектами и геометрическими неоднородностями, отражаясь и преломляясь на них. Распространение волнового пакета, особенно в неоднородной структуре, является сложным для анализа в общем виде и интерпретации процессом. Одним из возможных путей исследования процесса распространения акустических волн является аналитическое решение соответствующих дифференциальных уравнений движения при заданных граничных условиях. Такой подход может быть реализован для бездефектных моделей с простой геометрией в [22, 26, 123, 125, 129]. Однако аналитические решения становятся трудно реализуемыми для моделей со сложной геометрией или для объектов с дефектами. Другой подход к решению таких задач – численное решение [105, 108, 111]. Существуют два базовых численных метода, которые могут быть использованы для решения задач НК: метод конечных элементов (МКЭ) и метод граничных элементов (МГЭ). МГЭ имеет преимущество, которое заключается в том, что только поверхность ОК разбивается на дискретные области. По сути, численная задача становится одномерной. Преимуществом же МКЭ является широкий арсенал прикладных программных пакетов, которые имеют дружественный интерфейс, возможность широкого выбора решаемых задач. Известны работы [99, 134], где был использован МКЭ для численного анализа дисперсии ультразвуковых волн в пластинах, распространения акустических волн в горных породах [112, 101], акустических волн в воздухе [133, 146].

Чтобы соответствовать целям неразрушающего контроля, конечно-элементная модель должна с высокой точностью описывать распространение УЗ волн в диапазоне от 0,1 до 5 МГц. Высокочастотный диапазон требует качественного временного разрешения (малый шаг приращения по шкале времени). Кроме того, частоты мегагерцового диапазона имеют малую длину

волны, и чтобы учесть такие особенности, конечно-элементная (КЭ) модель должна состоять из элементов малых размеров (мм и менее). Все это вызывает необходимость увеличения количества элементов при моделировании реальных конструкций. В результате приходится решать задачу, которая имеет большую матрицу жёсткости. При этом требуются существенные вычислительные мощности.

Примем в первом приближении предположение об изотропности среды распространения акустической волны. Методы акустического контроля работают в диапазоне малых деформаций – в зоне упругости, где напряжение пропорционально деформации. Область нелинейной акустики в данной работе затронута не будет. Зависимость между напряжениями и деформациями дается законом Гука [64]:

$$\sigma_{ij} = \delta_{ij}\lambda\varepsilon_{kl} + 2\mu\varepsilon_{kl} \tag{1.1}$$

где σ_{ij} - компоненты тензора напряжений, ε_{kl} - компоненты тензора деформаций, $\delta_{ij} = 1$ когда $i=j$, $\delta_{ij} = 0$ когда $i \neq j$, λ, μ - константы Ламэ.

Диссертация основана на использовании формулировок теории упругости, которые заложены в используемых программных пакетах. Уравнение движения в матричной форме может быть записано как [92]:

$$M \cdot \vec{\ddot{u}} + C \cdot \vec{\dot{u}} + K \cdot \vec{u} = \vec{F}_0 \tag{1.2}$$

где M – матрица масс; C – матрица затухания (сопротивления); K – матрица жесткости; $\vec{F}_0$ – вектор приложенной нагрузки; $\vec{\ddot{u}}, \vec{\dot{u}}, \vec{u}$ – векторы смещения и его производные по времени. В дальнейшем затуханием пренебрегаем.

Весь процесс исследования акустико-эмиссионного контроля (АЭК) объектов может быть разделен на следующие основные этапы, которые непосредственно влияют на достоверность моделирования процесса АЭК: моделирование источника сигнала, моделирование распространения акустических волн в объектах и моделирование приема акустического сигнала.

1.2 Моделирование источника акустико-эмиссионного сигнала

Модель источника акустического сигнала рассматривается многими авторами, в том числе в работах [11, 27, 44, 145]. В [116] рассмотрено применение точечного, плоского и объемного источников для моделирования АЭ сигнала в программной среде COMSOL Multiphysics. Первый вариант – сила приложена в точке, второй вариант – пара сил (плоскостная постановка), и третий вариант – объемный источник. Для этих трех случаев источников приведено аналитическое и численное решение, сделан их сравнительный анализ. Приведены графики: сравнительный анализ радиальных и вертикальных перемещений для КЭ-модели, абсолютная погрешность КЭ-решения для различных источников: точечного, плоского, объемного. При этом показано, что погрешность численного решения в программе COMSOL Multiphysics одинаково мала для всех случаев источников акустической эмиссии. В работе не показано влияние выбора того или иного источника на результат конечно-элементного моделирования процесса распространения акустической волны в материале объекта контроля. При этом сделан вывод, что плоская модель источника имеет наибольшие преимущества перед остальными – меньшую абсолютную погрешность при сравнении с аналитическим решением.

В [113, 114] также обсуждается моделирование источника сигнала акустической эмиссии в виде дипольного момента. В работе [114] представлено два варианта нагружения алюминиевой пластины толщиной 4-7 мм и более тонкой пластины толщиной 1-3 мм.

В настоящее время для тестовых экспериментов и калибровки ПАЭ практики используют так называемый источник Су-Нильсена – излом хрупкого графитового стержня [33]. Такой излом генерирует сигнал, близкий по характеристикам к сигналу натурной АЭ трещины. При надавливании и последующем изломе грифеля создается напряженно-деформированное состояние поверхности пластины, к которой прижат стержень, и динамическая реакция

данной области приводит к излучению акустико-эмиссионного сигнала [33]. В работе [113] анализируется отклик модели на воздействие: монополь внутри пластины (под поверхностью) и на поверхности, а также диполь внутри и на поверхности пластины (см. рисунок 1.1). На рисунке 1.1 представлены результаты моделирования двух вариантов источника АЭ на частоте 100-300 кГц (рисунок 1.1 а) и на частоте 40 кГц (рисунок 1.1 б).

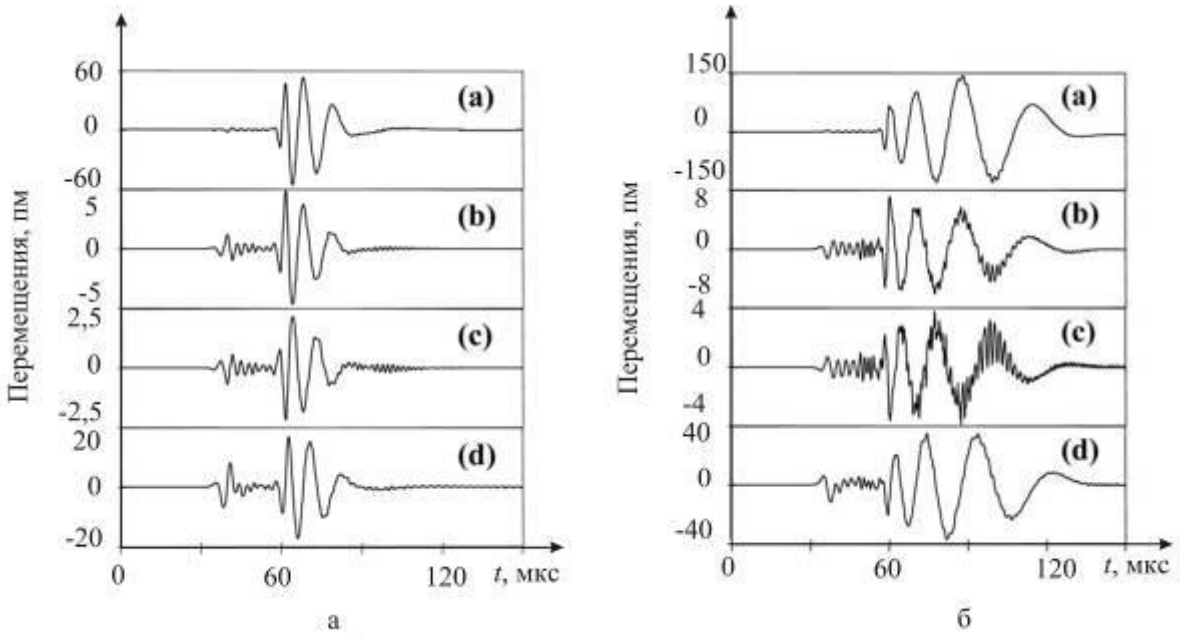


Рисунок 1.1 – Результаты моделирования

а - перемещения под поверхностью на 0,783 мм (100-300 кГц) (*a*) на поверхности монополь; (*b*) под поверхностью диполь; (*c*) на поверхности диполь; (*d*) под поверхностью монополь

б - перемещения под поверхностью на 0,783 мм (40 кГц) (*a*) на поверхности монополь; (*b*) под поверхностью диполь; (*c*) на поверхности диполь; (*d*) под поверхностью монополь

Соответственно представлены результаты моделирования отклика на источник на поверхности (рисунок 1.1 а, (*a, c*)) и под поверхностью (рисунок 1.1. б (*b, d*)). При этом анализ рисунка показывает, что качественно результаты моделирования для одной частоты не отличаются.

В работе [15] описано моделирование процессов акустической эмиссии на основе изложенной авторами теоретической модели функции распределения трещин по размерам.

Для анализа результатов акустического контроля используют частотный спектр сигнала. Например, в [14] рассмотрена задача восстановления параметров трещин, селекция их по размерам, по амплитудно-частотному спектру акустической эмиссии, то есть решается обратная задача. Использование преобразования Фурье подробно изложено в [3]. Частотная селекция позволяет отстроиться от шумов при анализе, от случайных низкочастотных выбросов. Используется также непрерывное вейвлетное преобразование, которое позволяет провести частотно-временной анализ акустического сигнала [75, 142].

В ряде работ [24, 25, 94] задача нахождения собственных частот ОК также решается численно. Примером обратной задачи является работа [25], где стержень длины L имеет полость малого характерного размера, закреплен на одном конце жестко, к другому концу приложено усилие в виде гармонической функции. Приведены зависимости первых резонансных частот от местоположения и объема несплошности в стержне.

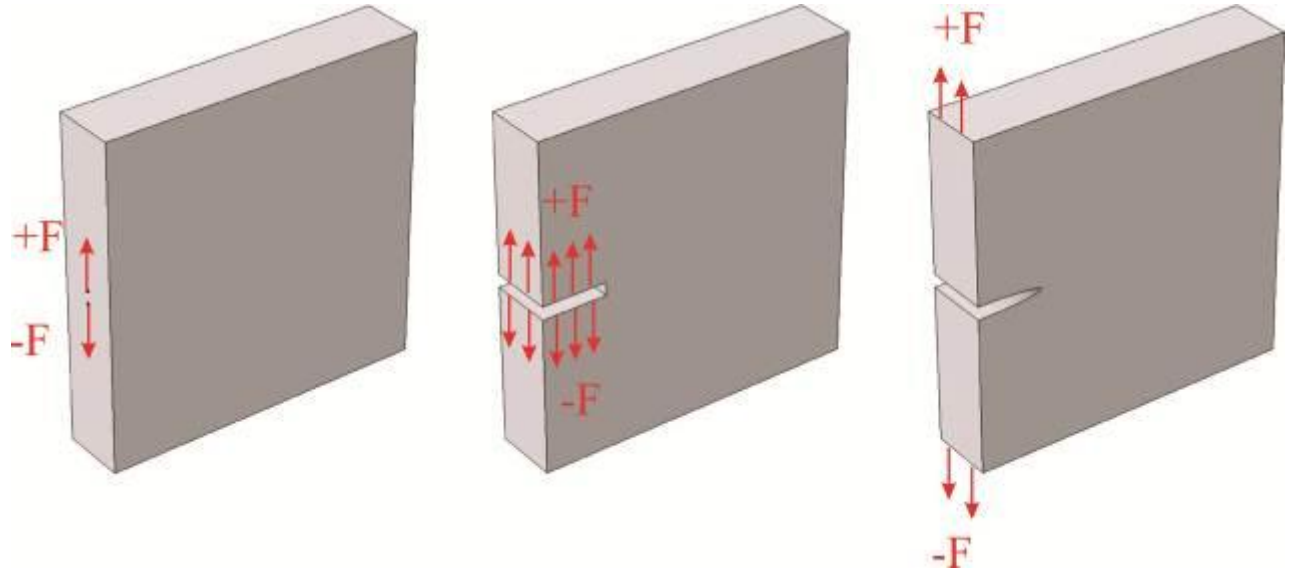
Однако традиционные методы анализа, базирующиеся на спектральной фильтрации, уступают в эффективности вейвлет-преобразованию [24, 79]. Непрерывное вейвлет-преобразование позволяет провести частотно-временной анализ сигнала, зафиксировать присутствие тех или иных частотных компонент в исследуемом сигнале во временной развертке. Его использование дает возможность количественной фиксации частот, выявления модуляций частот, их связи во времени [75]. Вейвлет-преобразование – интегральное преобразование, которое представляет собой свертку вейвлет-функции с сигналом, что позволяет сделать изучаемые величины исходного сигнала более информативными, или сжать исходный набор данных. Вейвлетное преобразование сигналов является обобщением спектрального анализа. Кроме того, вейвлетное преобразование может быть использовано для определения времени прихода полезного сигнала [79].

В работе [113] представлено вейвлет-преобразование генерируемых сигналов. Приведена зависимость моды сигнала от расстояния до поверхности. По результатам в работе [113] наиболее предпочтительным является моделирование с использованием диполя. В работе [114] этих же авторов показаны сравнительные результаты экспериментальных данных при использовании тонкой стальной пластины и численного моделирования акустико-эмиссионного импульса разными вариантами. Сделано вейвлет-преобразование для двух вариантов ориентации источника АЭ сигнала и показана хорошая сходимость результатов реального и численного эксперимента.

В работе [127] представлен результат моделирования акустико-эмиссионного источника сигнала с использованием численной модели. В ней рассчитаны динамические поля перемещений модели во время подрастания и продвижения трещины. Для сравнения с численным решением используются образцы с подобными концентраторами напряжений, как и в численной модели, при статическом нагружении, регистрируются сигналы натурной акустической эмиссии.

В [127] рассматривается три варианта нагрузки и три численных модели – точечная сила (рисунок 1.2 а), распределенная сила (рисунок 1.2 б), и модель трещины с радиусом скругления в вершине (рисунок 1.2 в).

Сравниваются три варианта моделирования источника акустической эмиссии, предложена модель трещины с динамическими изменениями исходной геометрии на основе механики разрушения (рисунок 1.2 в), приводятся результаты численного расчета для такой модели.



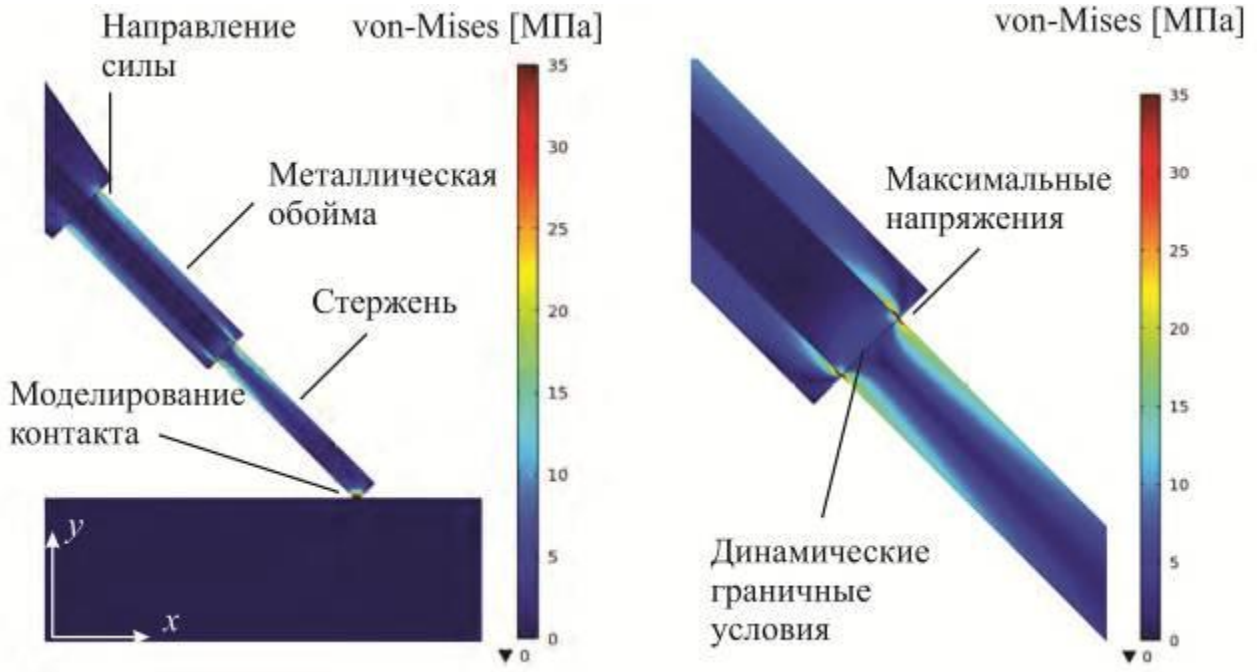
а б в

Рисунок 1.2 – Модели акустико-эмиссионных источников

а – точечно приложенная сила, б – протяженный источник, в – динамические изменения исходной геометрии на основе механики разрушения

Здесь же подробно рассмотрено формирование локальных напряжений в зоне контакта и дальнейшее распространение волны при изломе стержня и алюминиевой булавки с шейкой. Приведены сравнительные результаты вейвлет-преобразования для отклика численной модели и результатов эксперимента.

В работе тех же авторов [126] уделено внимание анализу процесса излома грифеля и возникающей при этом волне упругой деформации. В эксперименте исследованы зависимости возникающих сил от таких параметров, как длина свободного конца, диаметр стержня, угол наклона стержня при изломе. Эти данные положены в основу численного моделирования процесса распространения акустических волн. Также сделано сопоставление результатов, полученных в результате численного моделирования и с помощью аналитического решения, предлагаемого в литературе. На рисунке 1.3 а показана предложенная модель для анализа излома грифеля и результаты КЭ расчета и влияние граничных условий и распространение поля деформаций при статическом нагружении.



а б

Рисунок 1.3 – Результаты численного расчета

На рисунке 1.3 б показаны поля напряжений при статическом нагружении стержня при прижиме к ОК. В работе приведены результаты экспериментально измеренных значений силы, возникающей при прижиме свободного конца стержня к силоизмерительному преобразователю. Величина силы колеблется от 1,6 до 4 Н. Эти результаты использованы при численном моделировании. Также в работе приведены результаты моделирования распространения упругой волны в стержне, и далее ее прохождение и распространение в объекте контроля.

1.3 Моделирование процесса распространения упругих волн деформации

Процесс излучения материалом акустических волн в различных состояниях: при пластической деформации материала, при образовании трещины и ее развитии (продвижении) эффективно используется для диагностики и неразрушающего контроля различных материалов, но наиболее распространен для изделий из металлов и сплавов. На практике пьезоэлектрические

преобразователи (ПЭП) устанавливаются на объекте контроля исходя из практического опыта и предварительных экспериментов. При этом ПЭП могут быть расположены в зонах регистрации акустических волн, которые были неоднократно отражены, в том числе помехи, либо в зонах, где значение полезного сигнала близко к нулю. Установление коррелирующих зависимостей между параметрами сигналов, которые регистрируются аппаратурой НК, и параметрами реальных процессов, которые протекают в объекте контроля на разных стадиях разрушения, является сложной задачей, которая решается многими авторами [17, 18, 19, 55, 66, 100, 128, 135]. Аналитическое решение подобных задач затруднено [122, 123], при этом единственным возможным вариантом решения является численное моделирование. В [131, 119] предложено использовать численное моделирование для анализа приходящих акустических сигналов при геологических изысканиях. Результаты могут быть использованы для применения в будущем волн Рэлея для обнаружения пожара в угольных бассейнах. В геофизике обратная задача акустики также является очень актуальной и перспективной. В [118] применяют анализ отклика на акустическое воздействие для целей сейсморазведки.

Наиболее простым экспериментом, позволяющим оценить связь параметров АЭ сигналов и параметров нагружения, является испытания на разрушение образцов из разных материалов при параллельной регистрации АЭ сигналов, что реализовано в [55, 80, 81, 100]. Испытания могут быть проведены по различным схемам – растяжение, изгиб, кручение, либо комбинированное или циклическое нагружение. При этом производится регистрация величины раскрытия трещины, регистрация параметров напряженно-деформированного состояния – локальных деформаций, регистрация температуры объектов [23, 143, 144].

Задача численного моделирования распространения акустических волн в объектах НК решается многими авторами [29, 41, 103, 110, 148].

Для решения динамических задач акустики с использованием дифференциальных уравнений с частными производными в работе [12] применяют метод конечных разностей во временной области (КРВО) – FDTD

(Finite Difference Time Domain). Получены аналитические решения при импульсном воздействии, а также выведены рекомендации для пространственной дискретизации, данные рекомендации учитывались автором диссертации при выполнении работы. При моделировании волны воздействующий импульс имел форму полного периода синусоиды.

В работе рассматривались различные алгоритмы решения и их точность. Отклики модели при различных алгоритмах решения оказались значительно отличающимися. Из рисунка 1.4 а, б, в видно, что при разных алгоритмах решения численное моделирование может нести разные погрешности, а в некоторых случаях значительно отличаться от аналитического решения (точного), что показано на рисунке 1.4 а.

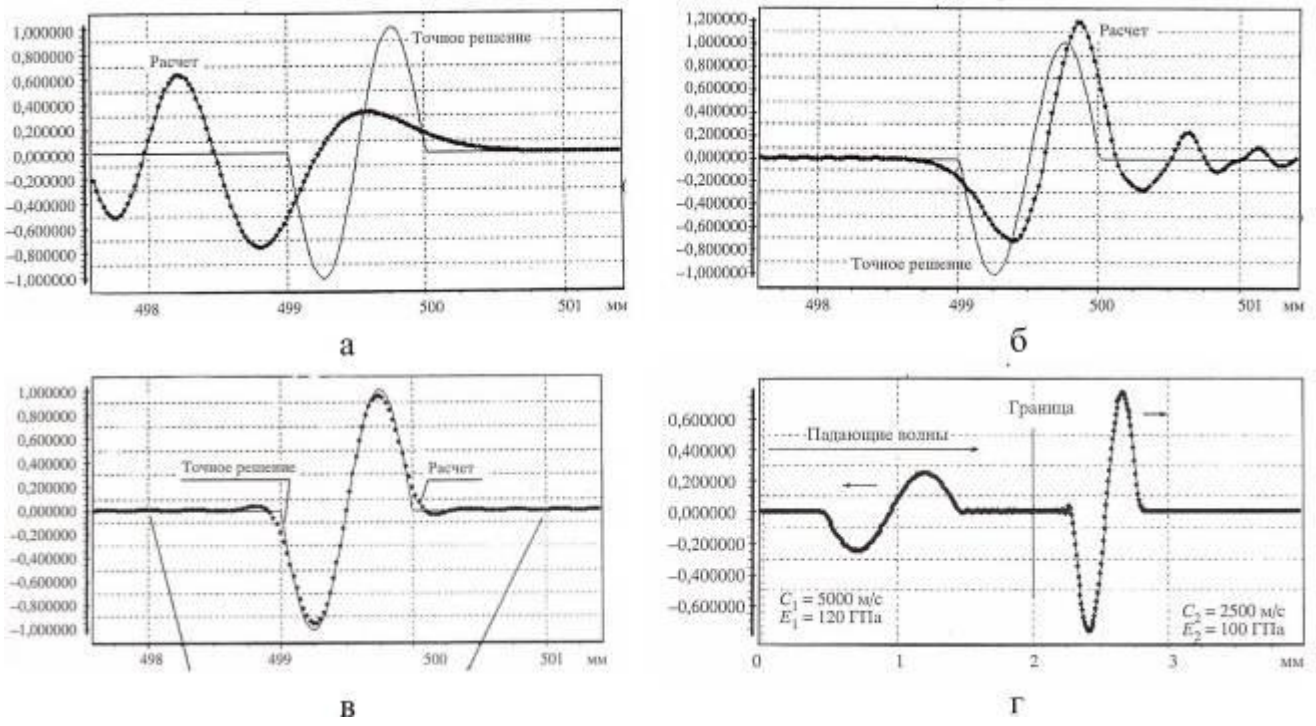


Рисунок 1.4 – Оклик модели на воздействие по различным алгоритмам
а – расчет волн алгоритмом 3x+3t, б – расчет волн алгоритмом 5x+3t
в – расчет волн алгоритмом 5x+5t, г – прохождение и отражение волн на границе раздела двух сред

На рисунке 1.4 амплитуда падающих волн равна 1. Слева – отраженная волна, справа – прошедшая волна. Численный тест проводится также для двух сред и границей их раздела при алгоритме, обеспечивающем наименьшую

погрешность расчета (5x+5t), результаты распространения отраженной и прошедшей волны показаны на рисунке 1.4 г.

Также в работе указаны ограничения при расчетах волновых процессов. Согласно рекомендациям авторов пространственный шаг Δx должен быть равен:

$$\Delta x < \frac{\lambda_{\min}}{40} \tag{1.3}$$

где λ_{min} – минимальная длина волны в данной области.

Временной шаг Δt должен быть равен:

$$\Delta t \le \frac{\Delta x}{2C_{\max}} \tag{1.4}$$

где C_{max} – максимальная скорость волн.

При соблюдении указанных требований обеспечивается погрешность решения не более 3 %. Также получены результаты для среды с затуханием.

В работах [138-141] рассмотрено численное моделирование распространения акустических волн с применением методики «the Elastodynamic Finite Integration Technique» (EFIT). Приведены результаты моделирования распространения акустической волны в плоскостной постановке в моделях из бетона с включениями и 1%-ой пористостью. Частота акустической волны составляла 200 кГц для модели алюминиевой пластины размерами а 150 × 150 × 1,5 мм, модели трубки длиной 1,35 м и диаметром 10,7 см, толщиной стенки 9 мм при точечном приложении нагрузки, модели электрического контакта, модели колеса с изогнутым профилем. В [140] приведены результаты численного моделирования акустико-эмиссионного сигнала в бетонной балке со стальным армированием, находящейся в сложном напряженно-деформированном состоянии. Рассмотрены результаты вариантов армирования трубчатыми элементами, заполненными цементным раствором. Преимущество численного моделирования заключается в относительно простой реализации эксперимента, в отличие от натурных испытаний.

В [115, 144] рассмотрено влияние анизотропии на процесс распространения акустических волн в численной постановке. Для примера рассмотрена задача

распространения акустической волны через *V*-образный сварной шов и преломление акустической волны на сварном шве. На рисунке 1.5 показана модель сварного шва рельса и различные варианты положения преобразователя, излучающего УЗ волну. При этом на разных изображениях зондирующий импульс находится поочередно в точках с координатами 40 мм (рисунок 1.5 а), 100 мм (рисунок 1.5 б), и 160 мм (рисунок 1.5 в). Сварной шов находится вблизи координаты 200 мм. Результаты приведены по логарифмической шкале до 24 дБ.

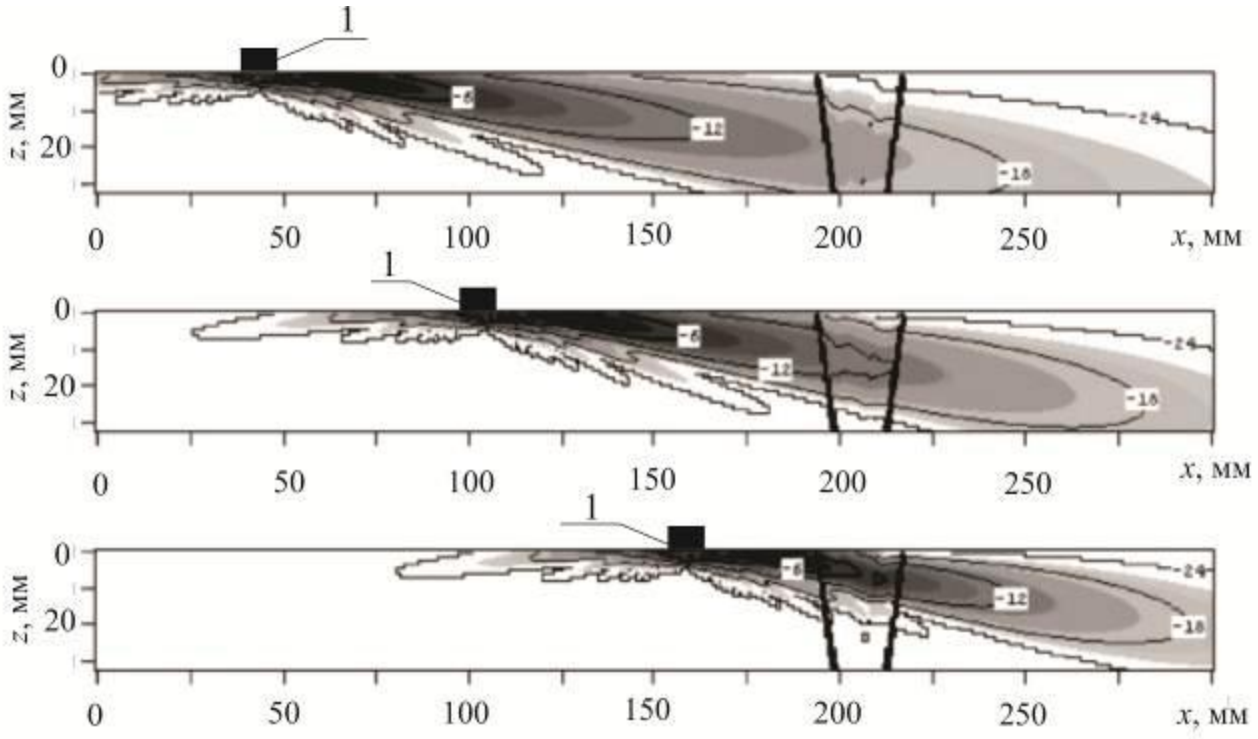


Рисунок 1.5 – Результаты моделирования прохождения акустической волны через сварной шов при различной координате излучателя

Преимуществом численного моделирования является возможность задать геометрические неоднородности и разные физико-механические свойства в моделях.

Проблема решения обратных задач аналитическим методом, когда параметры дефекта определяются по параметрам отраженных волн, упоминается многими авторами. В [42, 43, 102, 130] моделью является бесконечный стержень с поперечным концентратором (надрез), анализируется процесс прохождения по стержню и отражения от концентратора продольной волны при различных

граничных условиях, в том числе при погружении стержня в вязкую жидкость. В [109] анализируется отклик модели из акрила при различных вариантах нагружения. Модель имеет форму куба, на верхней грани выполнены засверловки для измерения акустического давления, сбоку прикреплена масса, которая создает акустический сигнал, ее положение может быть изменено для создания различных начальных условий. Изучается отклик модели – измеряется акустическое давление в различных точках поверхности при различных начальных условиях.

В настоящее время созданы системы трехмерного моделирования акустических волн [37, 54]. В этих работах проводится моделирование сканирования УЗ преобразователями рельсов, уложенных в путь. При этом программный продукт позволяет строить диаграмму озвучивания в относительных единицах (дБ) – конкретное сечение рельса в какой-то определенный момент времени. Программа на выходе дает возможность построения диаграмм изменения амплитуды, В-развертку, изменять параметры диагностирующего комплекта преобразователей – углы ввода, разворота, координаты датчиков в программе. Результаты можно использовать для визуализации процессов, происходящих при контроле.

В работе [37] рассматривается компьютерная программа «Импульс» моделирования работы электроакустического тракта дефектоскопов с прямыми и наклонными преобразователями. Моделями в данной работе служат многослойные структуры преобразователей и асимптотические зависимости электроакустических трактов, ведется расчет электрической части преобразователя. Приведены примеры «биения» пьезопластины при использовании в качестве протектора органического стекла. Керамика таких особенностей, как биение, не дает. Представленная программа дает возможность изменять: характеристики пьезокерамики, учитывать многослойность структуры преобразователей, учитывать сложный состав композитных (с полимерной матрицей) пьезопластин, а также моделировать работу преобразователя как части электрической цепи. Для пьезокерамики могут быть заданы: упругие модули, $Н/м^2$, пьезопостоянные, $Кл/м^2$, относительная проницаемость, плотность, $кг/м^3$,

коэффициент дельта, или модель пьезокерамики с заранее заданными свойствами. Выходными данными являются: форма регистрируемого импульса, его спектр, огибающая. В работе приведены зависимости формы регистрируемого сигнала от керамики, используемой в преобразователе.

Интересные результаты получены для бетонных объектов контроля при их ультразвуковой томографии с применением метода «фокусировки в точку» в [45]. Здесь применены преобразователи с фазированной решеткой, так же как и в [36], где осуществляется их моделирование. Данный класс преобразователей только начинает исследоваться отечественными учеными, в то же время за рубежом практика их применения высока. Ультразвуковая томограмма в этой работе построена в соответствии с алгоритмом «фокусировки», на ней видны сигналы, отраженные от донной поверхности и площадки повышенных напряжений около дефектной зоны.

В [117] обсуждаются результаты численного моделирования прохождения волн в протяженных объектах, получены диаграммы направленности акустического поля, при определенных уровнях звукового давления до 360 Гц.

В [121] создан и отработан алгоритм моделирования распространения акустических волн в бетонных балках. Предложено использование численного подхода для решения обратной задачи и восстановления портрета источника акустической эмиссии. В качестве объектов для эксперимента были взяты железобетонные балки с различной степенью армирования. предложенная методика следующая. Зарегистрированный реальный сигнал акустической эмиссии излучают «в обратном направлении» в численной модели. То есть существует определенный алгоритм, который позволяет решать обратную задачу. В экспериментальной части бетонные балки нагружались на специальном стенде и результаты регистрировались аппаратурой. Преобразователи закреплялись на объекте контроля жестко. Получены сравнительные результаты численного и физического эксперимента, приведен алгоритм для проведения моделирования.

1.4 Моделирование акустических преобразователей

Приемный тракт акустического преобразователя сильно влияет на результат контроля, так как принимает информативный сигнал и передает его для дальнейшей обработки. В акустическом контроле в качестве первичных преобразователей чаще всего используют пьезоэлектрические преобразователи, которые преобразуют смещение точек поверхности объекта в электрический сигнал. Их технические характеристики и конструкционные особенности сильно влияют на регистрируемый сигнал. Волна претерпевает изменения при преломлении на границах раздела сред и внутри самого преобразователя. Численное моделирование процессов, протекающих в преобразователях, имеет большое значение не только для практиков, которые проводят контроль, но может быть полезно для разработчиков и конструкторов. С использованием численных результатов может быть осуществлено прогнозирование параметров новых устройств [16]. Существующие проблемы, связанные с оптимизацией конструкции ПАЭ, во многом могут быть решены за счет численного моделирования [61, 62]. Численный подход требует меньших затрат на экспериментальную часть работы, включая выбор и исследование геометрических, физических, акустических характеристик, анализ взаимодействия слоев в преобразователе.

В [74] моделирование проводится с помощью системы Mathcad с использованием оригинальных алгоритмов, позволяющих в системе строить 3D-графические зависимости для плоскостей, перпендикулярных плоскости излучателя. Моделью излучателя служит 2-проводный противофазный излучатель. В работе [8] анализируются аналитические зависимости параметров нормальных волн, возникающих в полом пьезоэлектрическом цилиндре.

Много работ [39, 40, 77, 78, 108] посвящено анализу характеристик ПЭП в зависимости от размеров пьезопластины или начальных, граничных условий, условий проведения эксперимента. Из результата физического эксперимента в

[39] получена экспериментальная длительность импульса при физическом возбуждении в режиме холостого хода ПЭП (то есть при отсутствии ОК). Она составляет не более 40-50 нс. Данные результаты могут быть использованы при определении входных данных численного эксперимента.

В работах [48, 49, 50] расчетным путем проводится исследование влияния характеристик демпфера в преобразователе. В [48, 49] пьезоэлемент возбуждается электрическим импульсом в виде полупериода синусоиды на частоте собственных колебаний, то есть рабочей частоте. При этом варьируются параметры контактных слоев и протектора, изучается влияние демпфера на длительность и амплитуду излучаемого импульса в ОК.

В [35] приведены расчетные данные по аналитической оценке диаграмм направленностей: прямого преобразователя с круглой пьезопластиной с учетом упругого напряжения в пределах области возбуждения, то есть поверхности нанесенных на пьезопластину электродов, и в пределах области возбуждающего элемента, размер которого превышает размер области возбуждения. В [93] выполнено сравнение теоретических и расчетных данных на основе моделей авторегрессии, сделано теоретическое обоснование методик определения динамических характеристик преобразователя.

Таким образом, вопросу влияния и оптимизации физико-механических характеристик чувствительного элемента ПЭП с использованием численного моделирования посвящены многие работы, в том числе и [7, 13, 20, 60].

Возможные экспериментальные способы определения основных характеристик преобразователя акустической эмиссии установлены в [73]. Недостатками описанной в нем калибровки ПАЭ являются необходимость применения сложного и дорогостоящего оборудования и средств измерений, обеспечения лабораторных условий при проведении работ, при этом простых способов оценки амплитудно-частотных характеристик (АЧХ) преобразователей не существует, известные способы не предназначены для полевых испытаний. Кроме того, в нормативных документах в области АЭ и согласно методикам проведения АЭК не предусматривается процедура проверки параметров АЧХ

приемных преобразователей в процессе калибровки, что во многом связано со сложностями в реализации этой процедуры в производственных условиях.

В настоящий момент АЧХ преобразователя устанавливается, как правило, только при разработке документации на определенный тип преобразователей и на этапе первичной поверки (для преобразователей утвержденного типа).

Однако АЧХ может изменяться в процессе эксплуатации преобразователей, во многом на нее влияют способ установки и крепления преобразователя к объекту контроля, отсутствие контактной жидкости, сила прижатия преобразователя к ОК, температура, другие условия [46, 136]. Влияние на АЧХ различных начальных и граничных условий представляет собой сложную научно-практическую задачу. Зачастую этими условиями пренебрегают.

При этом основные документы в области НК и акустико-эмиссионной диагностики также не устанавливают однозначных требований к АЧХ излучателя сигнала при калибровки ПАЭ. В [73] источником является излом стеклянной капиллярной трубки, согласно требованиям [33]– излом графитового стрежня. В соответствии с методиками проведения акустико-эмиссионного контроля в качестве источника акустического сигнала может служить также пьезоэлектрический преобразователь [72], который обладает собственной АЧХ в режиме излучения. Понятно, что нормировать АЧХ такого рода источников невозможно. В связи с этим при калибровке преобразователя возникает необходимость такого излучателя сигнала, который излучает равномерный уровень сигнала на всех частотах.

В практических задачах, например, при АЭ испытаниях тонкостенных конструкций, когда акустические волны распространяются в ОК с разными скоростями в зависимости от моды, важно оценить АЧХ приемных преобразователей и выявить соответствие применяемых преобразователей практической задаче. В [73] ПАЭ подразделяются на четыре типа по частотному диапазону. Установлены рекомендации по применению того или иного типа преобразователей для контроля различных объектов – протяженных, промышленных, малых размеров. При этом резонансные датчики, работающие на

отдельной рабочей частоте, обладают большей чувствительностью, чем широкополосные [47]. Актуальной является задача создания многофункциональных перестраиваемых по частоте преобразователей, работающих на разных частотах. Они обладают большей, чем широкополосные преобразователи, чувствительностью и таким же рабочим диапазоном.

ПАЭ могут использоваться вне сферы ГРОЕИ, не быть утвержденного типа и не иметь свидетельства о поверке, в таком случае определение их основных характеристик перед испытаниями и отнесение их к тому или иному типу по частотному диапазону является необходимым, так как АЧХ может напрямую влиять на точность локализации дефекта. Таким образом, учитывая все вышеизложенное, разработка способа определения АЧХ преобразователей перед испытаниями в производственных условиях является актуальной задачей.

В настоящее время развиваются численные методы определения АЧХ датчиков. В работе [1], например, подробно проанализированы АЧХ, полученные экспериментальным путем, для различного рода пьезоэлементов с разными геометрическими и физическими характеристиками.

1.5 Моделирование границы раздела сред

Как было сказано выше, при решении задач акустического контроля чаще всего анализируются процессы в рамках геометрической акустики и теории распространения плоских упругих волн, тогда как явления, связанные с дифракцией акустических волн на неоднородностях подвергаются анализу реже. Возникновение неоднородностей в материале может быть связано с различными факторами: неметаллическими включениями, попадающими в материал при нарушении технологии изготовления, при термообработке материала и его эксплуатации. Однородных объектов, имеющих идеальную структуру, на практике встречается крайне мало [65, 66]. Объекты неразрушающего контроля, как правило, являются сложными системами с отличающимися механическими характеристиками в разных областях объекта. Примером может служить сварной

стык рельса, поверхностный наклеп, иные термомеханические последствия термообработки. При этом, если экспериментальные исследования механических характеристик провести достаточно просто [67] , то, например, оценить влияние дисперсии механических характеристик на процесс распространения УЗ волны уже достаточно проблематично. Численное моделирование позволяет создавать объекты, включающие области с разнородными механическими свойствами и при отработанных алгоритмах прогнозировать характер распространения акустической волны в этих объектах.

В работах [5, 6] произведен аналитический расчет параметров отраженных и прошедших сигналов в зависимости от граничных условий, и проведена серия экспериментов, подтверждающих экспериментальные данные.

В [147] показано поведение многослойных структур, получена их частотная характеристика с использованием КЭ моделирования в среде COMSOL. Варьируется масса, жесткость связи между слоями и коэффициент демпфирования многослойных структур, количество вязко-упругих слоев. Применены разные виды демпфирования. Получено хорошее согласование откликов моделей в численной постановке в среде COMSOL и экспериментальных данных. В [102] использованы результаты численного моделирования неоднородных структур для изучения поведения сложных конструкций – балок наземного сооружения. С использованием численного подхода могут более подробно и полно исследованы эффекты отражения и трансформации акустических волн [106]. В [120] изложен алгоритм моделирования прохождения акустических волн в многослойном бесконечном пространстве, дано аналитическое решение и численный алгоритм. Эти результаты использованы для моделирования рассеивания акустических волн, распространяющихся в породе, для обнаружения полостей или выработок в породе.

Таким образом, численное моделирование волновых процессов может быть реализовано практически в любых специальных расчетных программах, при этом требуется выполнение специальных рекомендаций.

1.6 Выводы по разделу 1

В первом разделе диссертации на основе анализа существующих методов моделирования процесса распространения акустических волн предложены модели и алгоритмы для анализа процесса прохождения акустических волн в различных объектах неразрушающего контроля.

В разделе произведено сравнение известных программных комплексов и приведены примеры алгоритмов для расчета процессов распространения акустических волн.

В разделе рассмотрена проблема пространственного и временного разрешения для подобного рода задач применительно к неразрушающему контролю. Пространственное и временное разрешение (дискретизация) являются критическими для сходимости численных результатов. Шаг интегрирования Δt «time increment» является тем параметром, при котором уравнение движения (1.2) имеет решение. Выбор такого шага является важным для точности решения. Точность моделирования увеличивается при уменьшении шага Δt. Для больших шагов Δt решение в высокочастотном диапазоне получается с большой погрешностью. С другой стороны, уменьшение шага приводит к увеличению времени решения задачи, поэтому необходима оптимизация Δt. Для схемы интегрирования Ньюмарка этот компромисс составляет 20 точек на один период максимальной частоты из цуга распространяющихся волн. Это дает точное решение уравнения движения (1.2). Такое условие может быть выражено как:

$$\Delta t = 1/(20 \cdot f_{max}) \qquad (1.5)$$

При выполнении диссертационной работы могут быть проанализированы одномерные (линейные), двумерные (оболочечного типа) и трехмерные (объемные) конечные элементы. В том случае, когда необходимо моделировать геометрические концентраторы типа отверстий и трещин, применяются трехузловые элементы. Распределение массы по элементам считается

однородным. Размер элементов подбирается таким, чтобы распространяющаяся волна могла быть пространственно разрешена.

По результатам анализа выбрана пространственная дискретизация. В рассмотренных работах рекомендованное количество узлов конечно-элементной модели составляет от 10 до 20 узлов на длину волны. Такие рекомендации можно выразить так:

$$l_e = \lambda_{min}/20 \ldots\ldots \lambda_{min}/10 \qquad (1.6)$$

где l_e – характерный размер элемента;

λ_{min} – наименьшая длина исследуемой волны.

Аналогично процессу определения шага Δt, сначала необходимо определить шаг дискретизации элементов по отношению к длине волны λ, которая, в свою очередь, зависит от частоты импульса. Для получения точных результатов при исследовании ослабления волны, изучении эффекта дисперсии может потребоваться более высокий уровень дискретизации, чем (1.6).

Условия (1.3) и (1.4) показывают, что для решения задачи о распространения волны с высокой частотой, которая имеет высокие значения $f_{\max}$ и малый шаг интегрирования, необходимо иметь существенные компьютерные ресурсы.

2 СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ МЕТОДОВ РАСЧЕТА ЭЛЕМЕНТОВ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ АКУСТИЧЕСКОЙ ЭМИССИИ

В объекте контроля от источника акустического сигнала распространяются объемные волны. Объемные волны разделяют на продольные, колебание частиц которых происходит в направлении распространения фронта волны и поперечные, колебание частиц которых происходит перпендикулярно направлению распространения волны. При выходе на поверхность возникают новые типы волн, так называемые поверхностные волны. Скорости разных типов волн различны и могут отличаться почти в два раза. Основными характеристиками волн являются длина волны λ и частота колебаний f частиц среды, амплитуда колебаний. Первичным преобразователем акустико-эмиссионного контроля является преобразователь акустического смещения частиц поверхности объекта в электрический сигнал, который в дальнейшем обрабатывается и анализируется. Для этой цели служит пьезоэлектрический преобразователь. ПЭП содержит пьезоэлектрическую керамику, имеющую определенную поляризацию. Основной характеристикой пьезоэлектрического преобразователя является амплитудно-частотная характеристика – зависимость амплитуды выходного сигнала от частоты приходящего на вход сигнала. Но методы расчета таких характеристик развиты недостаточно (см. разделе 1.4), что затрудняет проектирование датчиков, возможность прогнозирования их параметров [73].

Как следует из анализа работ [60, 61, 62] мода колебаний может существенно влиять на выходные параметры пьезоэлемента из-за возникновения резонансов и антирезонансов в пьезопластине.

Рассмотрим чувствительность преобразователя – отношение выходной характеристики (в случае пьезопластины это напряжение) к входной характеристике (акустическое давление или перемещение частиц поверхности). Выходная характеристика, очевидно, зависит не только от величины входного

сигнала (перемещения, сила, давление), но и от моды колебаний, на которой колеблется пьезопластина. Другими словами, выходной параметр, а именно, электрический потенциал на пьезопластине, пропорционален суммарным перемещениям торцов. Если окажется, что области торца имеют разный знак перемещений, то они могут частично или полностью компенсировать друг друга.

Аналитическое решение волновых процессов в преобразователе провести затруднительно [97]. В настоящей работе с помощью численных методов теории упругости представлен анализ процессов, протекающих в преобразователе как в твердом деформируемом теле при воздействии на него фронтов различных типов волн – продольной и поперечной. Так как основным чувствительным элементом преобразователя является пьезоэлектрическая керамика, то для нее будет произведен расчет для разных типов волн. В последующем эти результаты будут использованы для расчета трехслойной модели преобразователя.

2.1 Расчет пьезоэлектрической керамики

Модель, выбранная для расчета, представлена на рисунке 2.1:

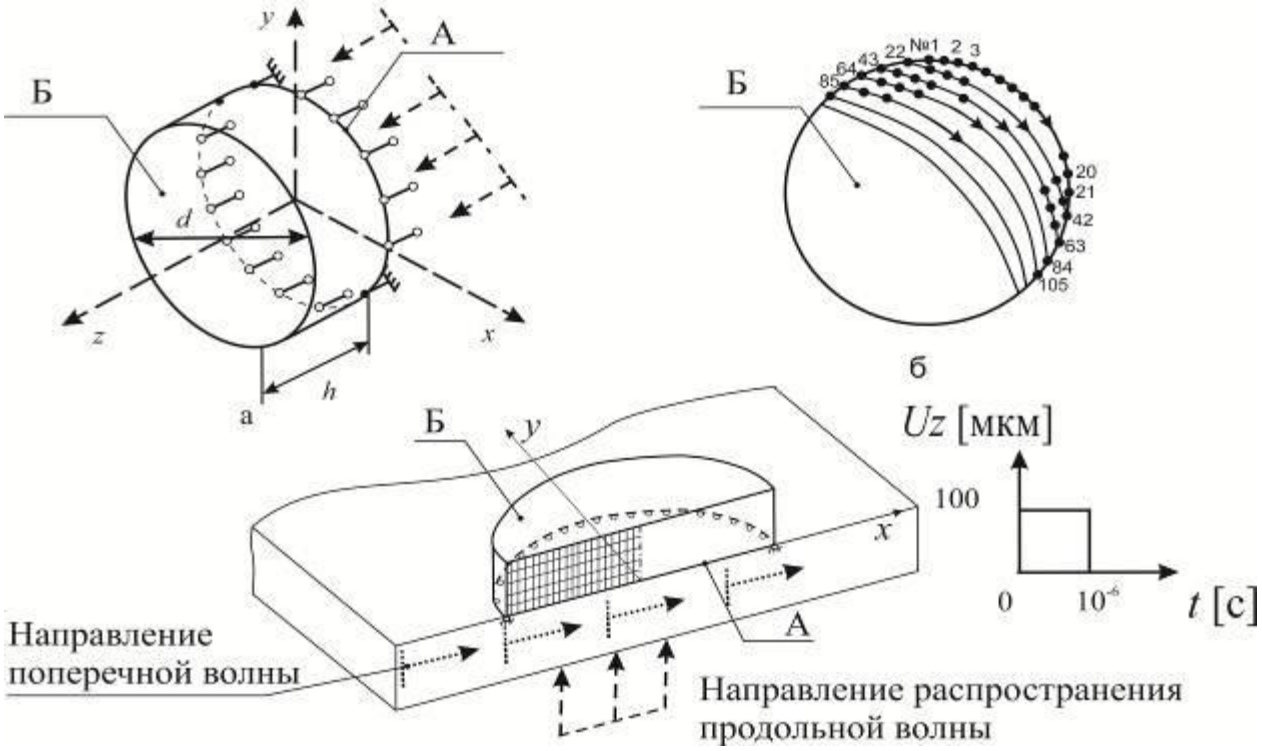


Рисунок 2.1 Модель пьезокерамики для расчета

Для Модели 1 пьезоэлектрического элемента были выбраны следующие характеристики – соотношение диаметра и высоты как 3:1. Такое соотношение *d*:*h*=3:1 характерно для элементов, применяемых в преобразователях акустической эмиссии с частотным диапазоном от 100 до 700 кГц.

Граничные условия для Модели 1 представлены на рисунке 2.1 а. По кромке грани А введен запрет перемещений по оси *z*. Кроме того, в двух узлах на кромке введен запрет перемещений по оси *x* и поворотов относительно осей *x*, *y*, *z*. Нумерация узлов модели представлена на рисунке 2.1 б.

В каждом узле грани А (кроме кромки) Модели 1 приложено перемещение по оси *z*, по модулю равное 100 мкм в форме меандра длительностью $1 \cdot 10^{-6}$ с, что показано на рисунке 2.1. Это воздействие моделирует приход на пьезопластину продольной акустической волны. Перемещение в каждом узле приложено по нормали к поверхности пластины. Расчет Модели 1 проводился в программном комплексе COSMOS/M в модуле нелинейного динамического расчета.

Для Модели 1 были выбраны физические свойства керамики. Основные физико-механические характеристики для нее приведены в Таблице 2.1.

Таблица 2.1 – Физико-механические характеристики керамики

	Модуль упругости E, МПа	Коэффициент Пуассона, ν	Плотность ρ, 10^3 кг/м^3
Материал 1 (керамика), Скорость продольной волны C_l = 9780 м/с; Дина волны λ_{min} =10 мм	$2{,}2 \cdot 10^5$	0,22	2,3

В рамках задачи анализируется компонента U_z перемещения узлов, принадлежащих грани Б. Фактически, перемещение грани Б относительного «нулевого» начального положения по оси *z* напрямую влияет на величину выходного напряжения.

Результаты расчета перемещений U_z для разных моментов времени приведены на рисунке 2.2 а – р, использована фиксированная цветовая шкала от минус 300 до плюс 300 мкм.

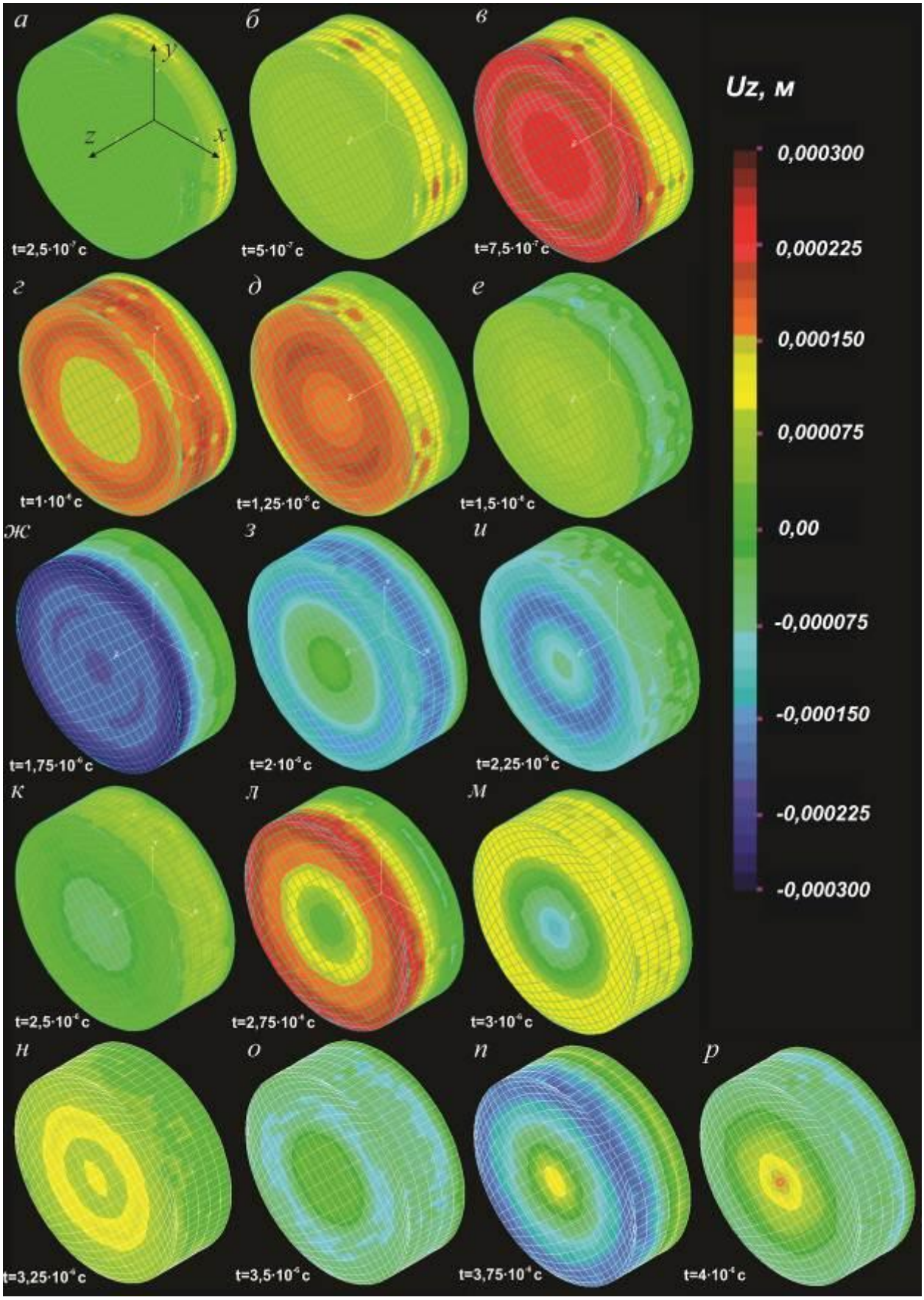


Рисунок 2.2 – Поля перемещений U_z для Модели 1 в разные моменты времени (приход продольной волны)

На рисунке 2.2 а представлено распределение перемещений U_z в момент времени $2{,}5\cdot10^{-7}$ с. Фронт волны начинает распространяться от грани А и доходит до середины модели. По теоретическим расчетам время прихода волны на грань Б составляет ~ $5\cdot10^{-7}$ с. Следующий рисунок 2.2 б показывает, что теоретические расчеты и результаты численного моделирования совпадают. В момент времени $7{,}5\cdot10^{-7}$ с на рисунке 2.2 в наблюдаются максимальные положительные перемещения грани Б - противоположной той, к которой прикладываются возмущающие перемещения. В следующие моменты времени $1\cdot10^{-6}$ с и $1{,}25\cdot10^{-6}$ с происходит процесс отражения волны от свободной грани Б. В момент времени $1{,}5\cdot10^{-6}$ с наблюдаются нулевые поля перемещений – волна отразилась от грани Б и проходит нулевое положение (грань А).

В момент времени $1{,}75\cdot10^{-6}$ с, наблюдаются максимальные отрицательные перемещения грани Б (синий цвет шкалы).

В момент времени $2\cdot10^{-6}$ с фронт волны сжатия идет к грани А, в момент времени $2{,}25\cdot10^{-6}$ с происходит отражение, и в момент времени $2{,}5\cdot10^{-6}$ с Модель снова имеет «нулевые» перемещения. В момент времени $2{,}75\cdot10^{-6}$ с наблюдаются положительные перемещения грани Б и процесс повторяется.

Таким образом, приход на пьезопластину продольной акустической волны приводит к возникновению продемонстрированной на рисунке 2.2 а–р моды колебаний. Основной деформацией является «растяжение-сжатие».

Далее рассмотрим вторую задачу для Модели 1, когда нагрузка в узлах грани А прикладывается по касательной к грани пьезопластины (по оси x), что соответствует приходу на грань А сдвиговой поверхностной волны. Граничные условия, длительность импульса и иные условия были сохранены как в предыдущей задаче, изменялось только направление перемещений с U_z на U_x. Так же, как и для первой задачи, анализируются перемещения U_z грани Б. Результаты конечно-элементного расчета при таком виде нагружения представлены на рисунке 2.3 а–р. Поля перемещений U_z даны в фиксированной шкале от минус 200 мкм до плюс 200 мкм. Зеленый цвет показывает зоны «нулевых» перемещений, то есть положения узлов, близких к начальным.

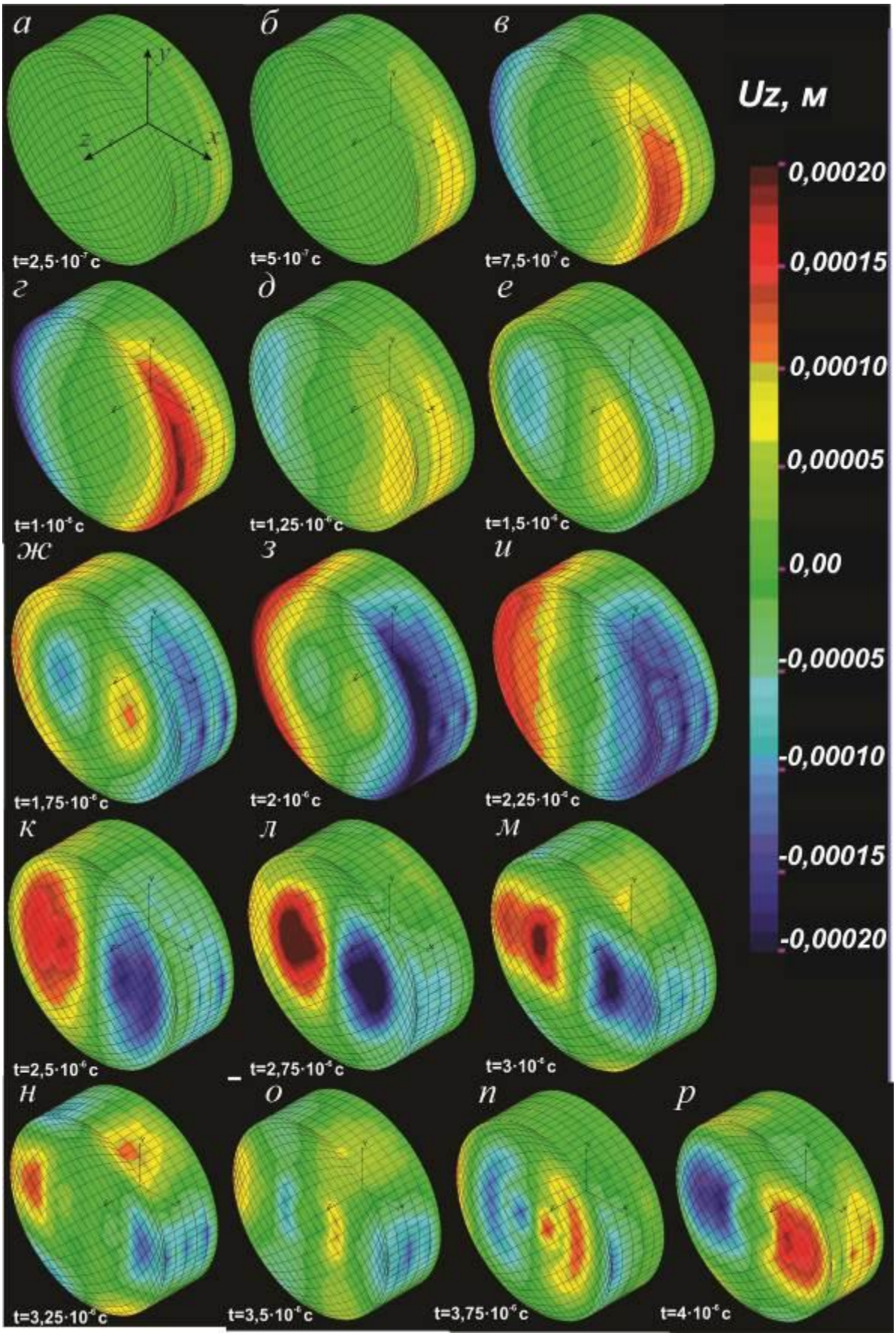


Рисунок 2.3 – Поля перемещений U_z для Модели 1в разные моменты времени (приход поперечной волны)

Анализ рисунка 2.3 показывает, что форма колебаний качественно изменилась. В момент времени $2{,}5\cdot10^{-7}$ с волна поступает от грани А, на рисунке 2.3 б максимум волны распространяется к середине модели, на рисунке 2.3 в максимум доходит до верхней грани, в момент времени $1\cdot10^{-6}$ с на рисунке 2.3 г волна доходит до верхней грани и перемещения U_z становятся максимальными на двух участках верхней грани. Дальнейшее развитие процесса показано на последующих рисунках. К моменту времени $1{,}5\cdot10^{-6}$ с (рисунок 2.3 е) зоны максимальных перемещений смещаются к центру, эпюра становится более сложной, с двумя перегибами, к моменту времени $2\cdot10^{-6}$ с (рисунок 2.3 з) максимальные перемещения U_z снова наблюдаются на краях, при этом зоны отрицательных (синий цвет) и положительных (красный цвет) перемещений меняются местами, если сравнивать с моментом времени $1\cdot10^{-6}$ с. Далее максимумы положительных и отрицательных перемещений смещаются снова к центру модели и процесс повторяется.

Анализ результатов математического моделирования показал, что мода колебаний определяет распределение перемещений узлов верхней грани модели, и эпюра перемещений существенно зависит от того, какая волна поступает на вход модели. В пьезоэлектрической пластине в качестве электродов выступают верхняя и нижняя грани, с которых снимается разность потенциалов, этот сигнал идет дальше по каналу в систему обработки сигналов.

Для того, чтобы оценить суммарную величину перемещений узлов верхней грани Модели 1 для двух разных задач с разными типами волн, проанализируем суммарные перемещения пластины в определенные моменты времени для двух вариантов нагружения Модели 1 – продольной и поперечной волнами. Выберем моменты времени: $7{,}5\cdot10^{-7}$ с, $1{,}25\cdot10^{-6}$ с, $1{,}75\cdot10^{-6}$ с, $2{,}25\cdot10^{-6}$с, $2{,}75\cdot10^{-6}$ с. Для анализа взяты моменты времени с равным шагом, включающие как поля максимальных положительных или отрицательных перемещений (рисунок 2.2 в, рисунок 2.2 ж, рисунок 2.3 в, рисунок 2.3 и), так и эпюры, близкие к нулевым (рисунок 2.2 д, рисунок 2.3 д), поля сложной формы (рисунок 2.2 л, 2.3 л).

На рисунках 2.4 а, б, в, г, д представлено распределение перемещений узлов грани Б при приходе продольной волны, рисунке 2.4 е, ж, з, и, к – при приходе поперечной волны для Модели 1. По горизонтальной оси каждого рисунка приведены номера узлов *n* от 1 до 441. По вертикальной оси представлены перемещения узлов в масштабе от минус 400 до плюс 400 мкм для рисунков 2.4 а, б, в, г, д, в масштабе от минус 200 до плюс 200 мкм для рисунков 2.4 е, ж, з, и, к.

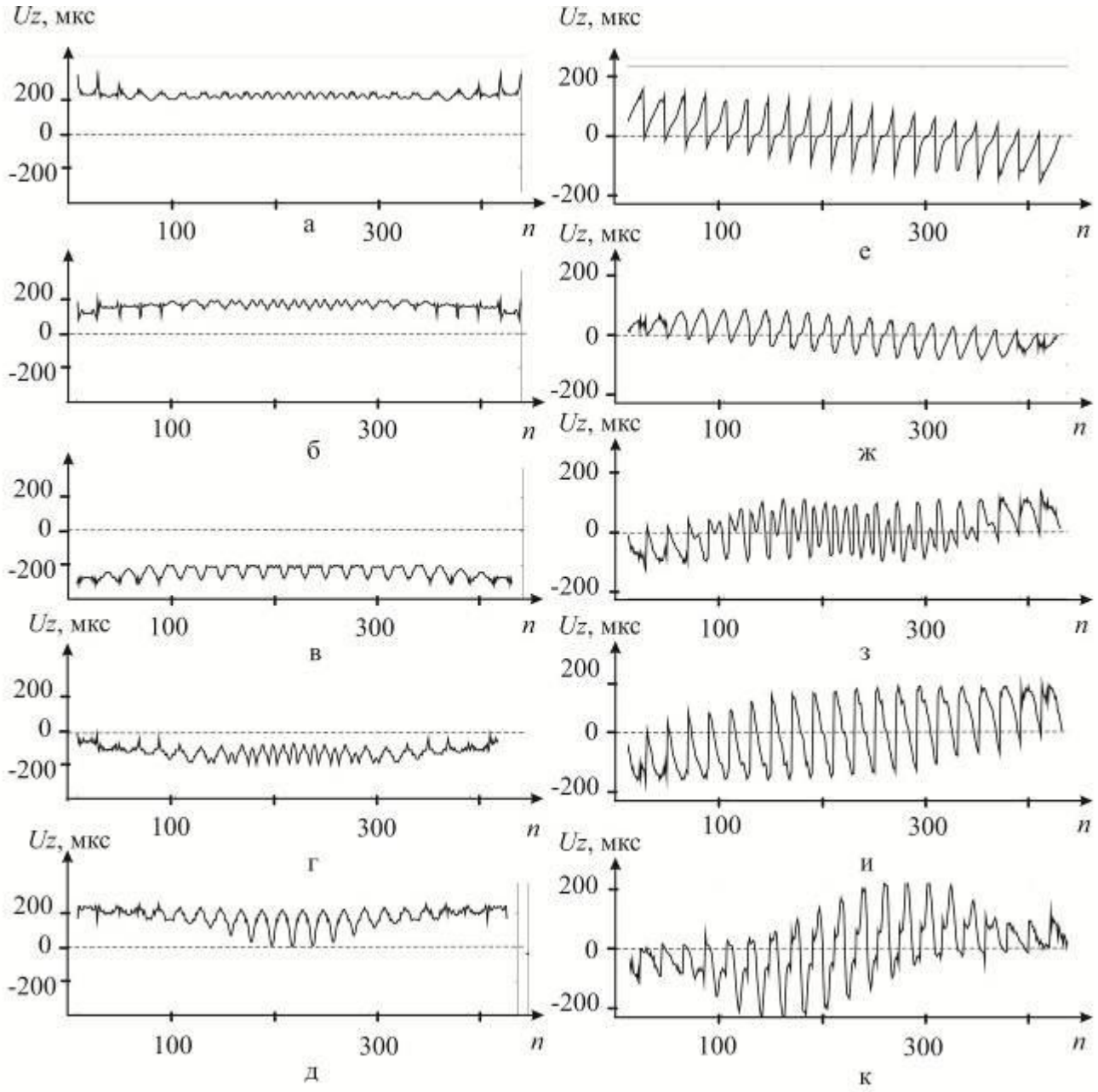


Рисунок 2.4 – Распределение перемещений U_z в узлах грани Б Модели 1 в разные моменты времени; а – при распространении продольной волны; б – при распространении поперечной волны

Суммарные перемещения по верхней грани находятся по следующей формуле:

$$U_t^{\Sigma} = \sum_{i=1}^{n} U_{zi} \tag{2.1}$$

где n – количество узлов на грани Б численной модели, в данном случае n=441.

Для обработки результатов использована программа MathCad. Величина суммарных перемещений узлов верхней грани Модели 1 в разные моменты времени представлены в таблице 2.2.

Таблица 2.2. Интегральная сумма U_t^{Σ} перемещений узлов грани Б, м (Модели 1)

t, 10^{-6} с	U^{Σ} Продольная волна, м	U^{Σ} Поперечная волна, м
0,75	0,100	$7{,}03 \cdot 10^{-13}$
1,25	0,072	$-1{,}44 \cdot 10^{-12}$
1,75	-0,106	$2{,}77 \cdot 10^{-11}$
2,25	-0,055	$-1{,}84 \cdot 10^{-13}$
2,75	0,080	$-7{,}57 \cdot 10^{-11}$

Таким образом, приход на пьезопластину разных волн – продольной и поперечной приводят к разным модам деформаций.

При этом анализ результатов показывает, что при приходе продольной волны колебания пластины происходят на моде «растяжение-сжатие». Такие колебания будут приводить к максимальному электрическому сигналу на обкладках пьезоэлектрической бочки, так как суммарная продольная деформация верхней грани в определенные моменты времени при такой моде максимальна.

При расчете следующей многослойной модели будет использовано моделирование только продольной волны.

2.2 Расчет преобразователя как многослойной структуры

Основными конструктивными элементами пьезоэлектрического преобразователя являются пьезоэлектрический элемент, техническая керамика, и

демпфирующий элемент (см. рисунок 2.5). Для анализа процессов, протекающих в пьезоэлектрическом преобразователе при приходе акустико-эмиссионной волны, рассматривается Модель 2, состоящая из трех слоев.

Нижний слой модели имел высоту 1 мм и свойства технической керамики, которая в реальных преобразователях защищает преобразователь от ударных воздействий и износа. Для среднего слоя модели толщиной 5 мм были заданы физико-механические свойства пьезоэлектрической керамики. Верхний слой Модели имел физико-механические свойства демпфирующего элемента (компаунд). Физическо-механические свойства трех слоев Модели представлены в таблице 2.3.

Таблица 2.3 – Физико-механические характеристики слоев Модели 2

	Модуль упругости E, МПа	Коэффициент Пуассона, ν	Плотность ρ, 10^3 кг/м^3	Дина волны λ_{min}, мм
Материал 1 (керамика), Скорость продольной волны C_l = 9780 м/с	$2{,}2 \cdot 10^5$	0,22	2,3	10
Материал 2 (пьезоэлектрическая керамика), Скорость продольной волны C_l = 3935 м/с	$1{,}2 \cdot 10^5$	0,33	7,75	4
Материал 3 (компаунд), Скорость продольной волны C_l = 78 м/с	6,1	0,49	1	0,08

Граничные условия для Модели 2 представлены на рисунке 2.5. По кромке грани А введен запрет перемещений по оси *z*, в двух уздах кромки обеспечен запрет перемещений по оси *x* и поворотов относительно осей *x*, *y*, *z*.

К каждом узле грани А приложено перемещение по оси *z*, по модулю равное 100 мкм в форме импульса длительностью $1 \cdot 10^{-6}$ с (см. рисунок 2.5). Это воздействие моделирует приход на пьезопластину продольной акустической волны. Перемещение в каждом узле приложено по нормали к поверхности пластины. Расчет Модели 2 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. Перемещения грани Б относительного «нулевого» начального положения по оси *z* напрямую влияют на величину выходного напряжения преобразователя.

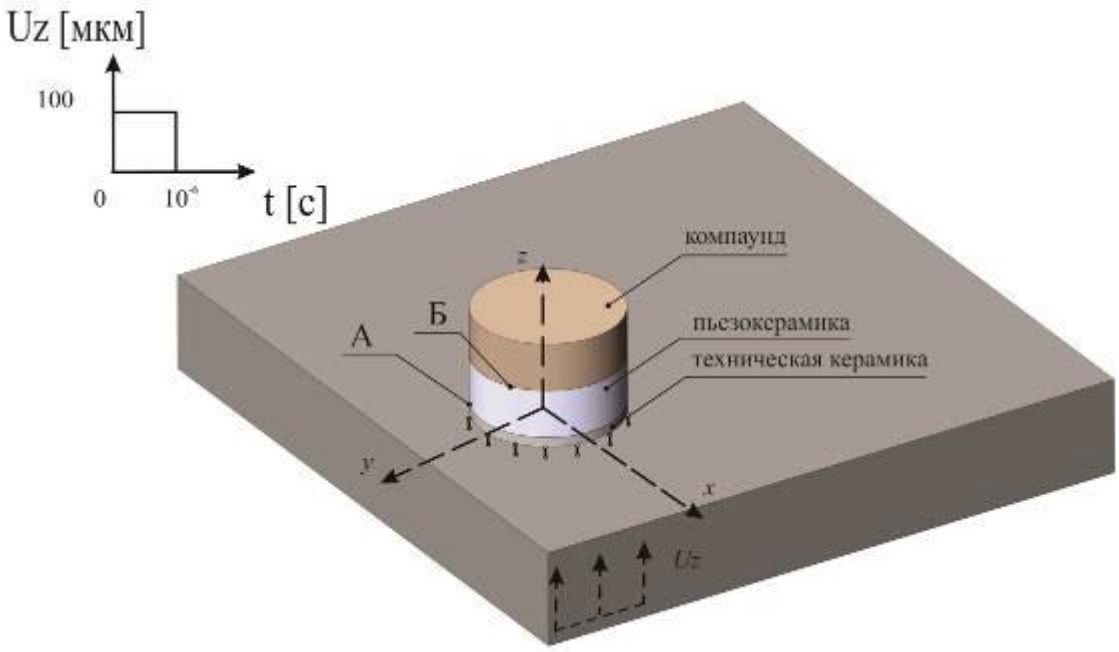


Рисунок 2.5 Модель трехслойного преобразователя для расчета

Результаты расчета для разных моментов времени приведены на рисунке 2.6 а–о для Модели 2 в ее поперечном сечении. На рисунке представлено распределение перемещений U_z в фиксированной цветовой шкале от минус 200 до плюс 200 мкм. По теоретическим расчетам время прихода волны на нижнюю грань пьезокерамики составляет $\sim 1 \cdot 10^{-7}$ с. На рисунке 2.6 а представлено распределение перемещений U_z в момент времени $2{,}5 \cdot 10^{-7}$ с. Фронт волны начинает распространяться от грани А, проходит слой технической керамики. Далее волна распространяется в слое пьезоэлектрической керамики (см. рисунки 2.6 б-в). В момент времени $7{,}5 \cdot 10^{-7}$ с на рисунке 2.6 в волна доходит до середины пьезокерамики, на этом же рисунке виден фронт отражённой волны от границы раздела сред. По теоретическому расчету время прохода волны слоя пьезокерамики в 5 мм составляет $1{,}3 \cdot 10^{-6}$ с. В следующие моменты времени $1 \cdot 10^{-6}$ с и $1{,}25 \cdot 10^{-6}$ с основной фронт волны доходит до верхней грани пьезокерамики, также видны фронты отраженных волн.

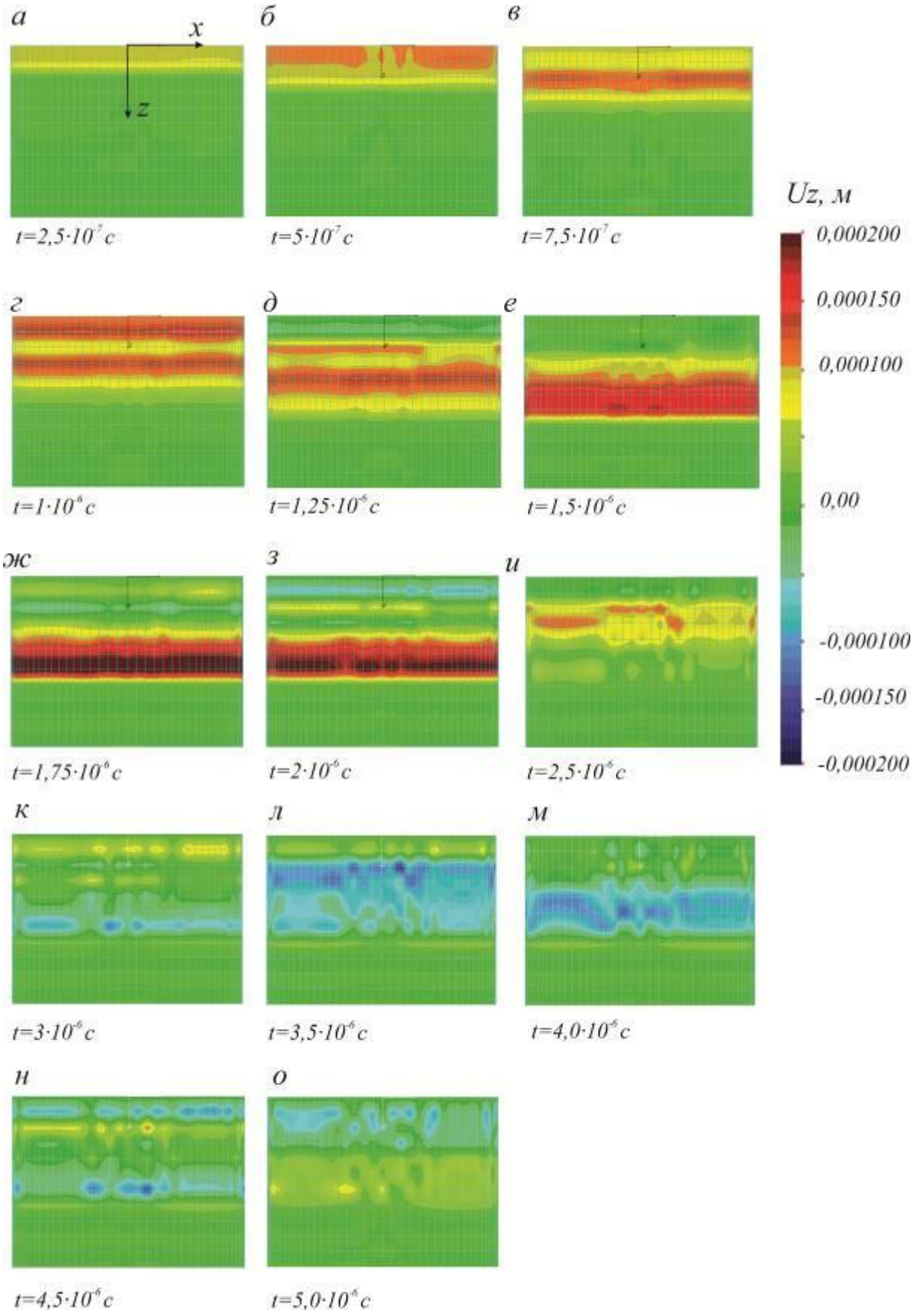


Рисунок 2.6 – Поля перемещений U_z для Модели 2 в разные моменты времени (приход продольной волны)

В момент времени $1{,}5\cdot10^{-6}$ с, $1{,}75\cdot10^{-6}$ с, $2{,}0\cdot10^{-6}$ с наблюдаются максимальные перемещения верхней грани пьезокерамики. В момент времени $2{,}0\cdot10^{-6}$ с волна частично проходит в слой компаунда и начинает распространяться в нем с очень малой скоростью.

Основная же волна отражается от верхней грани пьезокерамики и идет в обратном направлении. В этот же момент времени ($2{,}0\cdot10^{-6}$ с) в области технической керамики наблюдается слой с деформациями растяжения.

В момент времени $2{,}5\cdot10^{-6}$ с волна, отразившись от верхней грани пьезокерамики, распространяется в обратном направлении. В момент времени $3{,}0\cdot10^{-6}$ с (рисунок 2.6 к) в верхней части пьезокерамики находится зона растяжения. В момент времени $3{,}5\cdot10^{-6}$ с на рисунке 2.6 л вся пьезопластина находится в состоянии растяжения. В момент времени $4{,}5\cdot10^{-6}$ с видны переотражения в технической керамике и пьезокерамике. К моменту времени $5{,}0\cdot10^{-6}$ с в результате переотражений наблюдаются две зоны растяжения и сжатия в верхней и нижней зонах Модели 2. Результаты расчета показали возможность моделирования процессов распространения акустических волн в ПЭП как в многослойной структуре.

На следующем рисунке 2.7 приведено распределение перемещений U_z, по горизонтальной оси приведены номера узлов n от 1 до 441. Для оценки уровня сигнала взята разность перемещений ΔU_z верхней и нижней граней Модели 2. Представлены результаты для разных моментов времени: $0{,}5\cdot10^{-6}$ с, $1{,}0\cdot10^{-6}$ с, $1{,}25\cdot10^{-6}$ с, $1{,}5\cdot10^{-6}$ с, $1{,}75\cdot10^{-6}$ с, для наглядности полученных результатов выбрана единая шкала перемещений от минус 200 до плюс 250 мкм. На графике распределения перемещений для моментов времени $0{,}5\cdot10^{-6}$ с, $1{,}0\cdot10^{-6}$ с видно, что ΔU_z отрицательно – нижняя грань растянута, а перемещения верхней близки к нулю. Для моментов времени $1{,}25\cdot10^{-6}$ с, $1{,}5\cdot10^{-6}$ с, $1{,}75\cdot10^{-6}$ с разность ΔU_z постепенно возрастает и переходит в область положительных значений – в эти моменты волна доходит до верхней грани, растягивает ее, что можно наблюдать на рисунке 2.6, при этом показания ΔU_z становятся максимальными.

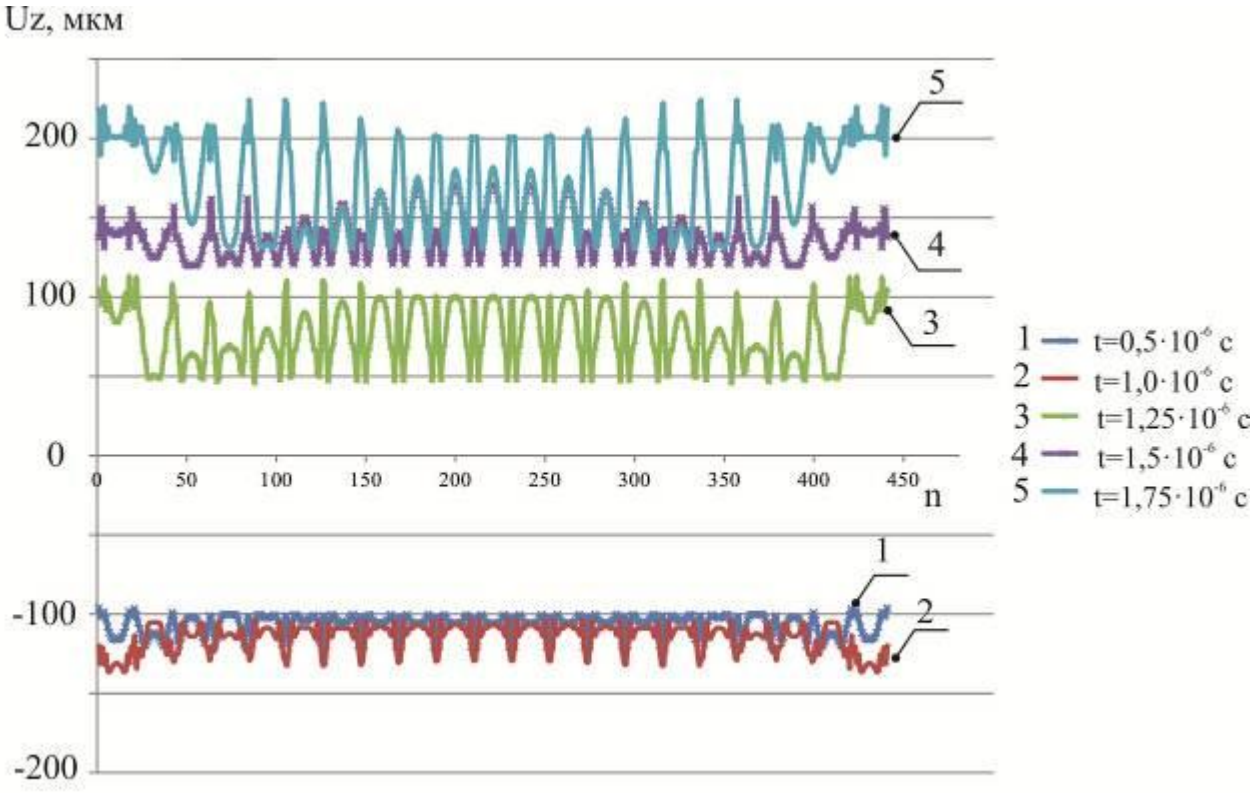


Рисунок 2.7 –Распределение разности перемещений ΔU_z верхней и нижней граней в разные моменты времени

Таким образом, программная среда, в которой рассчитываются Модель 2, позволяет оценить не только качественно отклик моделей на различное воздействие, но и вычислить количественную оценку. Данные результаты могут быть использованы при определении АЧХ преобразователей.

Сводные результаты суммарных перемещений узлов верхней грани Модели 2 в разные моменты времени представлены в таблице 2.4.

Таблица 2.4. Суммарные перемещения ΔU_t^{Σ}, м Модели 2

t, 10^{-6} с	U^{Σ}, м
0,5	$-4{,}71\cdot10^{-2}$
1,00	$-5{,}07\cdot10^{-2}$
1,25	$3{,}42\cdot10^{-2}$
1,50	$6{,}07\cdot10^{-2}$
1,75	$7{,}52\cdot10^{-2}$

При анализе многослойной модели на уровень сигнала во многом влияют окружающие пьезоэлектрический элемент слои. при этом анализ показывает, что

разность компоненты перемещений U_z равномерна для разных моментов времени, ее суммарная величина достигает десятков миллиметров, что видно из таблицы 2.4. При этом основном деформацией Модели и, в частности, пьезокерамики, являются перемещения растяжения-сжатия.

2.3 Разработка конструкции акустической головки для повышения надежности и точности акустико-эмиссионного контроля

В диссертационной работе предлагается устройство для крепления преобразователя, улучшающее метрологическую надежность и повышающее точность акустико-эмиссионного контроля.

Регистрируемая ПАЭ форма волны несет информацию о полном сигнале акустического излучения, но не всегда можно достоверно сказать, какие преобразования происходят с сигналом при его распространении в объекте контроля и в самом преобразователе. Результаты, изложенные в разделах 2.1 и 2.2, говорят о том, что для получения достоверного акустического сигнала необходим надежный акустический контакт, так как он напрямую влияет на получение высокого уровня сигнала на выходе преобразователя.

И так как на точность и достоверность акустико-эмиссионного контроля в большой степени влияет способ крепления преобразователя, предлагается устройство для обеспечения надежного контакта преобразователя и объекта контроля.

Проблема крепления преобразователя к объекту контроля становится особенно актуальной, так как большинство объектов, подвергаемых акустико-эмиссионному контролю, являются объектами сложной формы и имеют поверхность с грубой шероховатостью. При этом даже при условии зачистки поверхности объекта контроля под место установки преобразователя акустической эмиссии могут оставаться неровности до 5 мм (наплавы, наклепы, клейма).

В рамках настоящего исследования создан опытный образец магнитной системы датчика, который позволит решать проблему плохого акустического контакта в месте установки преобразователя акустической эмиссии [69]. Предлагаемая акустическая головка (см. рисунок 2.8) содержит преобразователь и магнитную систему для прижима преобразователя к изделию. Прижим производится в два этапа, с тем, чтобы исключить ударное воздействие на чувствительный элемент преобразователя и обеспечить поворот преобразователя внутри корпуса в зависимости от профиля поверхности, на которую он устанавливается. Устройство обеспечено упругим элементом, снабжено приспособлениями для поворота преобразователя и магнитной системы.

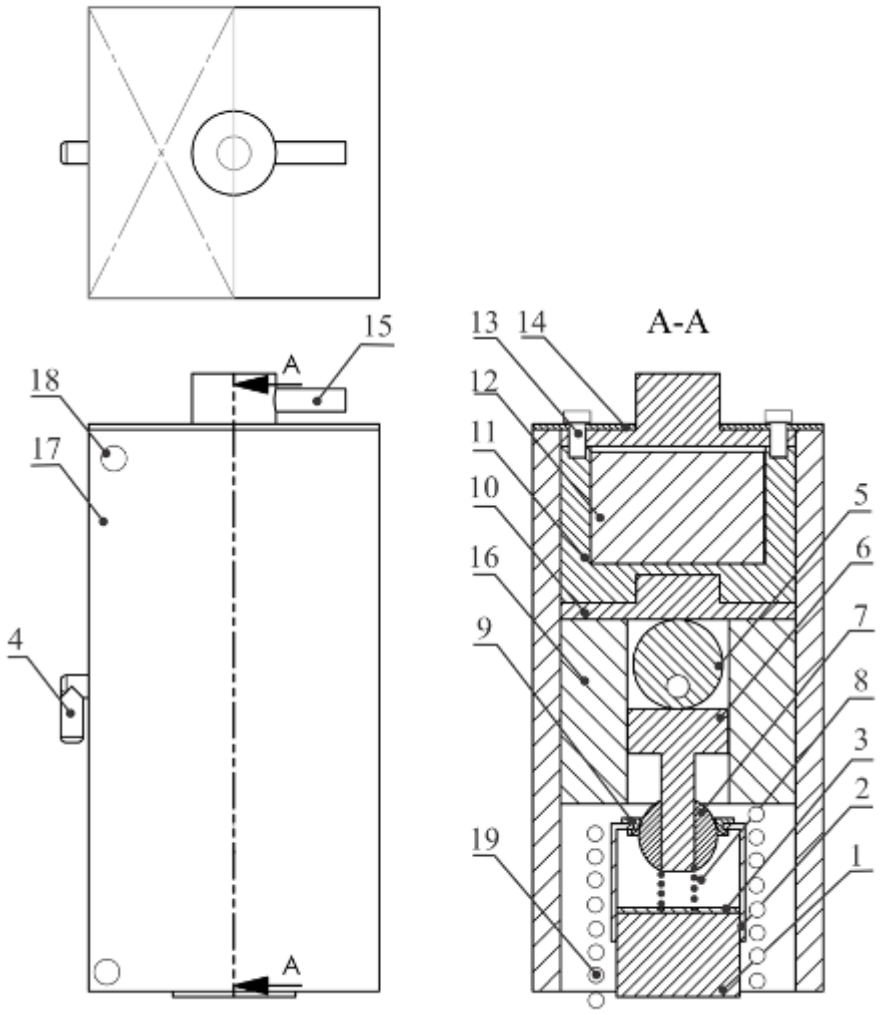


Рисунок 2.8 – Акустическая головка

Магнитная система выполнена в виде секторного магнита, расположенного внутри ферромагитного корпуса, обеспечивающего два состояния системы – включена (примагничивается) и выключена (не примагничивается). Магнитная система также имеет внутренний упругий элемент, предназначенный для регулирования силы прижатия преобразователя и обеспечения угла его наклона относительно вертикали не менее, чем на 15°. Это необходимо при установке на объекты с грубой шероховатостью, когда преобразователь может быть случайно установлен на неровность.

Приспособление для поворота преобразователя содержит преобразователь 1, который жестко закреплен с рамой 2, металлическая прокладка 3 свободно лежит на преобразователе 1 и служит для защиты преобразователя 1 от механических воздействий. Ручка 4 и эксцентрик 5 жестко скреплены, эксцентрик 5 находится в контакте с поршнем 6, на который жестко насажен ролик 7, воздействующий на преобразователь 1 через пружину 8. Для снижения трения между роликом 7 и рамой 2 установлена прокладка 9.

Приспособление для поворота магнита содержит шпонку 10, на которой может вращаться кожух 11 с секторным магнитом 12 и прикрепленной винтами 13 крышкой 14 с ручкой для поворота 15.

Таким образом, устройство включает в себя приспособление для поворота преобразователя и приспособление для поворота магнита, а также направляющую 16 с цилиндрическим отверстием для поршня 6 и ферромагнитные пластины 17, скрепленные винтами 18. Пружина 19 поддерживает устройство для поворота преобразователя. Устройство защищенно патентом Российской Федерации №152495 (Приложение А).

Акустическая головка обеспечивает стабильный прижим преобразователя к объекту контроля вне зависимости от качества поверхности места установки преобразователя, что обеспечивает повышение достоверности контроля. При этом наличие регулируемой магнитной системы обеспечивает отсутствие ударного воздействия на керамический протектор преобразователя, и риск выхода ПАЭ из

строя уменьшается, метрологическая надежность преобразователя акустической эмиссии повышается.

Таким образом, акустическая головка позволяет повысить надежность и достоверность результатов контроля. Такая конструкция может применяться при плановых испытаниях методом акустической эмиссии, как в лабораторных условиях, так и на предприятии.

2.4 Выводы по разделу 2

Предлагаемый подход к моделированию элементов преобразователей акустической эмиссии показал, что с применением конечно-элементного пакета COSMOS/M возможно проводить анализ различных моделей.

В разделе рассмотрен анализ модели одиночной пьезопластины при приходе на нее продольной и поперечной волн, а также анализ модели преобразователя как многослойной структуры.

Получены результаты и произведен анализ процессов, протекающих при приходе продольной и поперечной волн на пьезокерамическую пластину с соотношением сторон 3:1.

В результате проведения численных экспериментов показано, что приход на чувствительный элемент преобразователя продольной волны приводит к максимальным суммарным перемещениям верхней грани и, соответственно, к стабильному выходному сигналу на пьезоэлектрической пластине. В то же время приход поперечной волны на чувствительный элемент преобразователя приводит к такой форме (моде) колебаний, при которой суммарные перемещения верхней грани практически равны нулю. Это в свою очередь приводит к малому выходному сигналу.

При анализе многослойной модели выбраны основные три элемента акустико-эмиссионного преобразователя – техническая керамика, пьезоэлектрическая керамика, демпфирующий элемент.

Получены результаты распространения продольной акустико-эмиссионной волны в многослойной модели преобразователя. При этом анализируется поведение пьезоэлектрической пластины, эффекты отражения и прохождения волны, а также произведена оценка разности перемещений торцов пьезопластины, с которых снимается сигнал в реальном преобразователе в разные моменты времени.

По результатам работы установлены следующие рекомендации: акустико-эмиссионные преобразователи следует устанавливать в местах объекта контроля, в которых нормальная компонента перемещений достигает максимальных значений.

В разделе также описано предложенное и реализованное устройство «Акустическая головка», позволяющая, во-первых, обеспечить стабильный прижим преобразователя к объекту контроля вне зависимости от качества поверхности места установки преобразователя, во-вторых, обеспечить отсутствие ударного воздействия на керамический протектор преобразователя и уменьшить риск выхода преобразователя из строя, что повышает метрологическую надежность преобразователя акустической эмиссии при использовании такой конструкции.

3 ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ РАСПРОСТРАНЕНИЯ ВОЛН В ТЕСТОВЫХ ЗАДАЧАХ

Предварительное численное моделирование процесса распространения акустических волн в исследуемом объекте позволяет прогнозировать поведение объектов контроля с учетом их особенностей, и использовать эти результаты в практике неразрушающего контроля. Применительно к акустико-эмиссионному контролю эти результаты можно использовать для оптимального расположения регистрирующих датчиков и при подборе их характеристик [82].

В данном разделе рассматривается разработка алгоритмов и оптимизация моделирования процесса распространения акустических волн в телах с различной геометрией с помощью стандартного пакета конечно-элементного моделирования в программной среде COSMOS/M, а также оценка корректности численных методов применительно к задачам данного типа.

Общее уравнение движения акустической волны в матричной форме имеет вид:

$$M \cdot \vec{\ddot{u}} + C \cdot \vec{\dot{u}} + K \cdot \vec{u} = \vec{F}_0 \qquad (3.1)$$

где M – матрица масс; C – матрица затухания (сопротивления); K – матрица жесткости; $\vec{F}_0$ – вектор приложенной нагрузки; $\vec{\ddot{u}}, \vec{\dot{u}}, \vec{u}$ – векторы смещения и его производные по времени. Для корректного решения (3.1) должны быть соблюдены условия по пространственной и временной дискретизации. Условие по пространственной дискретизации может быть выражено так:

$$l_e = \lambda_{min}/20 \ \ldots \ \lambda_{min}/10 \qquad (3.2)$$

где l_e – характерный размер элемента, λ_{min} – наименьшая длина исследуемой волны.

$$\Delta t = 1/(20 \cdot f_{max}) \qquad (3.3)$$

где Δt – временной шаг, f_{max} – максимальная частота возбуждаемой волны.

Объекты неразрушающего контроля могут быть представлены как линейные, плоские, объемные тела и иметь различные особенности. Например, при акустико-эмиссионном контроле нефтегазопроводов пользуются упрощением, и рассматривают объект как линейный. При контроле котлов и цистерн, в том числе под давлением, объекты рассматривают как плоские модели (используют «развертку» их поверхности). При контроле строительных конструкций, деталей и узлов вагонов, объекты рассматривают как объемные.

Первыми рассматриваемыми моделями в данном разделе были линейные объекты. Линейные модели служили для изучения поведения акустических волн в телах с простой геометрией, для оценки временных параметров процессов распространения акустических волн. Для создания линейных моделей использовались двухузловые элементы TRUSS2D или BEAM2D. Кривая зависимости силы от времени в большинстве задач выбрана в форме меандра.

3.1 Численное моделирование процессов распространения волны в линейных объектах

Для отработки методики была рассмотрена простая с геометрической точки зрения задача – стержень длиной 1000 м (см. рисунок 3.1 а). В таблице 3.1 эта задача обозначена как Модель 1.

Таблица 3.1 – Параметры исследуемых моделей

	Длина, L, м	Размер элемента l_e, м	Колич. элементов	Колич. узлов	Тип элементов	Сила, F, кН	Длительность импульса
Модель 1 Стержень	1000	2	500	501	TRUSS2D	1	10^{-3} с
Модель 2 Стержень	4	2	2	3	TRUSS2D	1	10^{-3} с
Модель 3 Стержень	10,8	0,2	54	55	BEAM2D	1	$5 \cdot 10^{-6}$ с
Модель 4 Стержень	10,8	0,02	512	513	BEAM2D	1	$5 \cdot 10^{-6}$ с
Модель 5 Стержень	10,8	0,2	54	55	BEAM2D	1	$5 \cdot 10^{-3}$ с

Механические характеристики и скорость C_l распространения продольной волны для Моделей указаны в Таблице 3.2.

Таблица 3.2 – Свойства материала моделей

	Модуль упругости, E, МПа	Коэффициент Пуассона, ν	Плотность, ρ, кг/м^3	Модуль упругости второго рода, G, МПа	Скорость продольной волны C_l, м/с
Сталь	$2{,}1\cdot10^5$	0,28	$7{,}9\cdot10^3$	$7{,}9\cdot10^4$	5200
Медь	$1{,}1\cdot10^5$	0,37	$8{,}9\cdot10^3$	$4{,}0\cdot10^4$	3500

Скорость C_l продольной акустической волны определяется по формуле [92]:

$$c_l = \sqrt{\frac{E}{\rho}}, \tag{3.4}$$

где E – модуль упругости, Па, ρ – плотность материала, кг/м^3. Для линейной модели анализируется только продольная волна.

Полагая скорость распространения ультразвуковых волн C_l постоянной, время прихода волны до заделки для Модели 1 известно.

На рисунке 3.1 а на правом конце стрежня стрелкой показана прикладываемая внешняя сила F и зависимость этой силы от времени. Нижняя грань стержня, который моделируется балочными 2-х узловыми элементами типа TRUSS2D (l_e = 2 м), имеет ограничения по перемещениям вдоль оси y.

По оценке длина распространяющейся волны от данного импульса составляла порядка 6 м, что сравнимо и больше размера конечных элементов модели. Такая прикладываемая нагрузка соответствует возбуждению акустических волн с частотой не более 1 кГц. Время распространения продольной волны в модели до заделки и обратно равняется $T = 2L/C_l = 0{,}38$ мс. В соответствии с рекомендациями [112], шаг интегрирования выбирался равным $\Delta t = 10^{-5}$ с. При расчете переходного процесса шаг уменьшался до $\Delta t = 10^{-8}$ с.

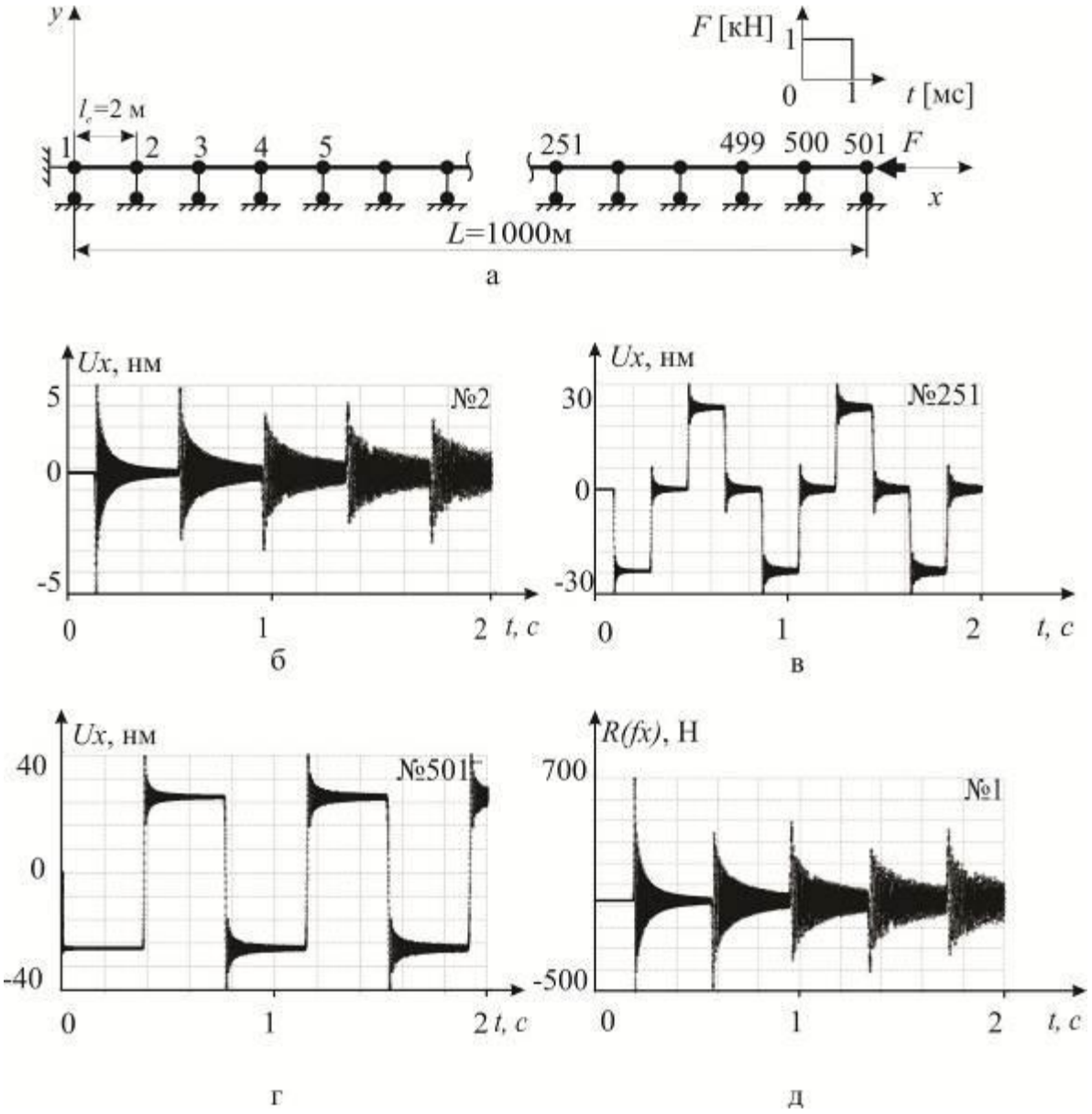


Рисунок 3.1 - Отклик Модели 1 на импульсное воздействие

а – граничные условия для линейной модели, б – перемещение U_x в узле №2, в - перемещение U_x в узле №251, г - перемещение U_x в узле №501

Различный характер перемещений U_x наблюдается в узлах с разными координатами. Рассматривались узлы у заделки, в середине и на свободном конце (№1, 2, 251, 501). Зависимости перемещений U_x этих узлов от времени представлены на рисунке 3.1 б, в, г, д соответственно. Под воздействием силы F узел 501 моментально отклоняется в область отрицательных значений (рисунок 3.1 г). К середине стержня волна доходит уже с задержкой в 0,1 с, отклоняя узел 251 в область отрицательных значений (см. рисунок 3.1 в), а к жесткой заделке

волна доходит за 0,2 с (см. рисунок 3.1 д). При учете физико-механических характеристик материала скорость распространения волны составляет 5200 м/с, тогда расчетное время распространения волны до заделки составляет 0,2 с. Полученные результаты согласуются с теоретическим расчетом. В момент времени t=0,2 с волна отражается от заделки и распространяется в обратном направлении. Время прихода отраженной волны составляет t=0,4 с, в этот момент времени крайний узел 501 возвращается в первоначальное (нулевое) положение и начинает отклоняться в обратном направлении (см. рисунок 3.1 г).

Таким образом, на свободном конце модели видны результаты распространения прямой и отраженной волн. Общим для всех функций U_x является строгая повторяемость процесса с периодом T = 0,4 мс. Чем ближе к жёсткой заделке (рисунок 3.1 б), тем больше перемещение U_x имеет вид затухающих колебаний линейной системы с большей жесткостью. Для той же модели на рисунке 3.1 д показана зависимость реакции $R(f_x)$ в узле №1 Модели 1 от времени. Как и следовало ожидать в случае отсутствия затухания, амплитуда реакции близка к амплитуде прикладываемой силы. Наблюдаемая дисперсия колебаний (размывание во времени и пространстве) обусловлена разной скоростью прохождения мод волн.

Численные методы расчета объектов неразрушающего контроля должны учитывать эффекты отражения, сложения и преломления этих волн. Для оценки корректности моделирования волновых процессов в моделях по предложенному алгоритму и изучения сложения волн в объектах при численном расчете, следующая модель имела простую геометрию – два элемента и три узла.

На рисунке 3.2 а приведена Модель 2, представляющая собой стержень длиной 4 м. Модель состояла из балочных двухузловых элементов типа TRUSS2D (l_e = 2 м). Нижняя грань стержня имела ограничения по перемещениям вдоль оси y. Нагрузка прикладывалась на двух концах стержня в виде импульса. Характер перемещений U_x в узлах №1, 2, 3, представлен на рисунке 3.2 б, в, г соответсвенно. В середине стержня в узле №2 произошло сложение колебаний, таким образом перемещение в узле посередине модели U_x = 0, что показано на

рисунке 3.2 в. На концах стержня, как и ожидалось, колебания происходят в противофазе, волновой процесс со временем затухает.

Анализ тестовой Модели 2 показывает, что реализованный алгоритм позволяет корректно учитывать эффекты сложения волн.

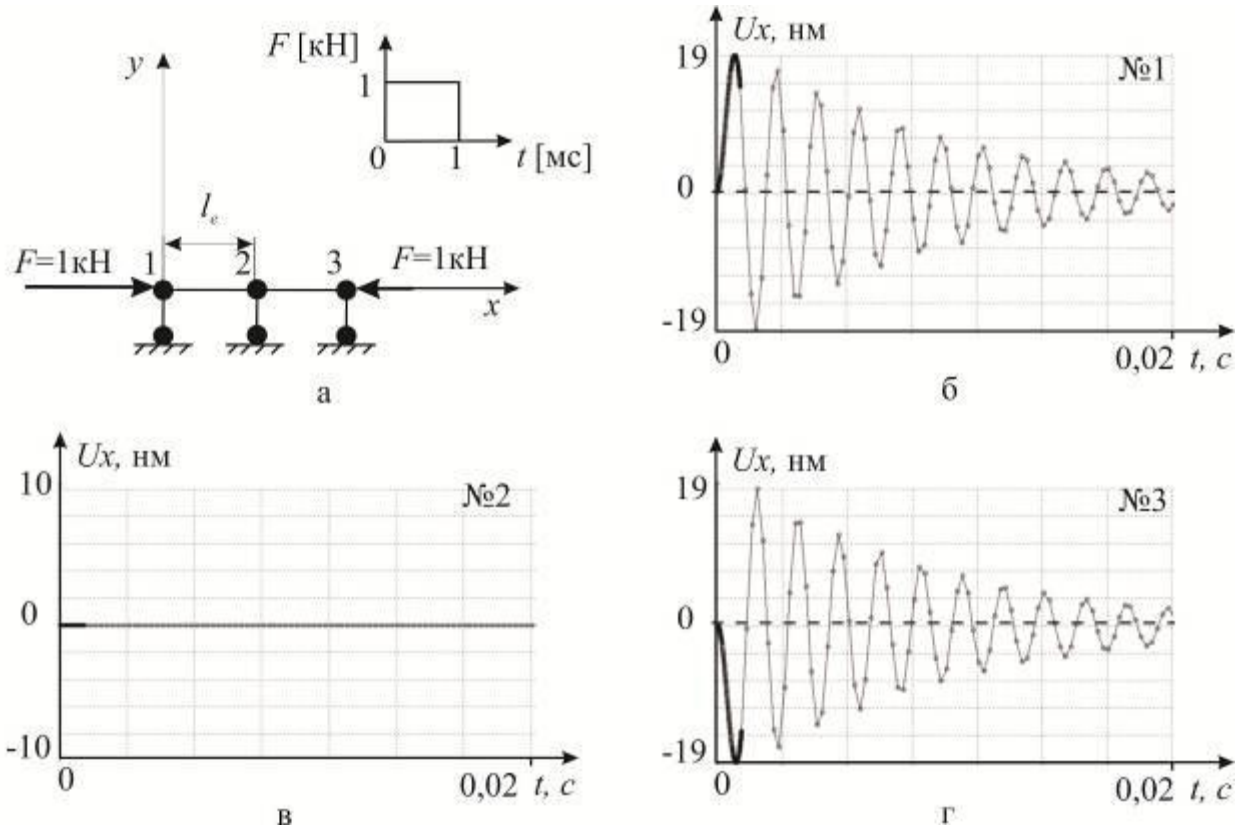


Рисунок 3.2 - Модель 2. Стержень из двухузловых элементов

а – граничные условия для линейной модели; б – перемещение U_x в узле №1; в - перемещение U_x в узле №2, г - перемещение U_x в узле №3

В практике неразрушающего контроля встречаются объекты, геометрия которых позволяет рассматривать их как линейные. Такими объектами могут быть трубопроводы, стержневые элементы в строительстве и т.д.

Рассмотрим модель стержня для подкрепления вертикальных откосов. На стадии его забивания в грунт возникает проблема больших прогибов под действием собственного веса и веса ударника, закрепляемого на конце стержня. Для уменьшения таких прогибов целесообразно устанавливать промежуточные опоры по длине стержня. Актуальной является задача установки минимального количества опор, обеспечивающих допускаемую величину прогиба стержня. Для

решения такой задачи была создана модель длинной 10 метров, состоявшая из 50 элементов типа BEAM2D. Размер каждого элемента составлял l_e = 0,2 м. С помощью численной модели предлагается выбрать количество опор по длине стержня и расположить их в разных узлах для оценки величины прогиба, чтобы при длине модели 10 м максимальный прогиб составлял не более 20 см. Для модели были заданы диаметр 18 мм, площадь поперечного сечения S, момент инерции I_z.

С помощью численного расчета было найдено оптимальное расположение опор в узлах 1, 16, 42 с учетом собственного веса и веса ударника (m=10 кг). В дальнейших расчетах использовались эти данные по геометрии стержня для создания Модели 3 с начальным прогибом.

Модель 3 состояла из 54 элементов с характерным размером элемента l_e=0,2 м. (см. рисунок 3.3 а). Нагрузка была приложена в виде прямоугольного импульса. Дополнительно были введены площадь поперечного сечения S, момент инерции относительно центральной оси J_z. В узле 55 прикладывается сила 1 кН, длительностью 5 мкс (форма показана на рисунке 3.3 а). Результаты расчета для нескольких узлов модели представлены на рисунке 3.3 б, в, г.

При этом расчетное время прихода волны до жесткой заделки для недеформированного стержня составляет 2 мс, из рисунков видно, что полный период прохода волны от свободного конца до жесткой заделки и обратно составляет примерно 4 мс. Анализ перемещений для узлов 11, 35 и 55 показывает, что узлы Модели 3 отклоняются с задержкой, пропорциональной расстоянию от крайнего узла, так же, как и для Модели 2. первым отклоняется первый узел, с некоторой задержкой узел 35, далее узел 11. Период колебаний узлов постоянен.

Однако по сравнению с результатами, полученными для прямолинейных моделей, колебания не симметричны относительно нулевой оси перемещений, видны эффекты биения.

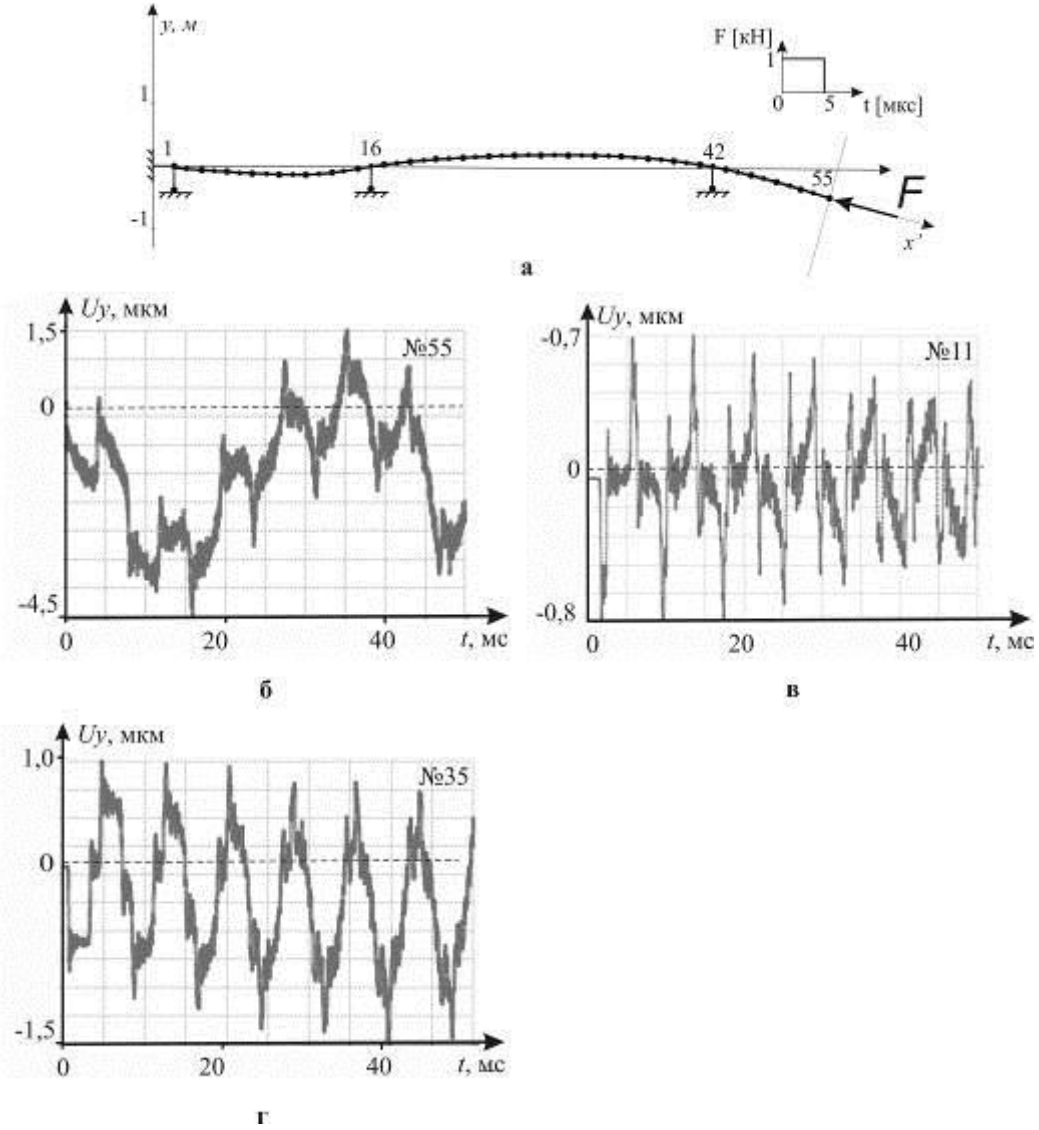


Рисунок 3.3 – Модель 3. Стержень с криволинейноц геометрией.

Единичное ударное воздействие

а – граничные условия для линейной модели; б – перемещение U_y в узле №55; в - перемещение U_y в узле №11, г - перемещение U_y в узле №35

Для исследования влияния густоты сетки на точность расчета была создана и проанализирована Модель 4 с теми же параметрами и характеристиками, но с большим в 10 раз количеством элементов. На рисунке 3.4 показано сравнение результатов расчета для двух моделей с разной густотой сетки для узлов с одинаковыми координатами, результаты расчета приведены за равный промежуток времени t = 0,5 с.

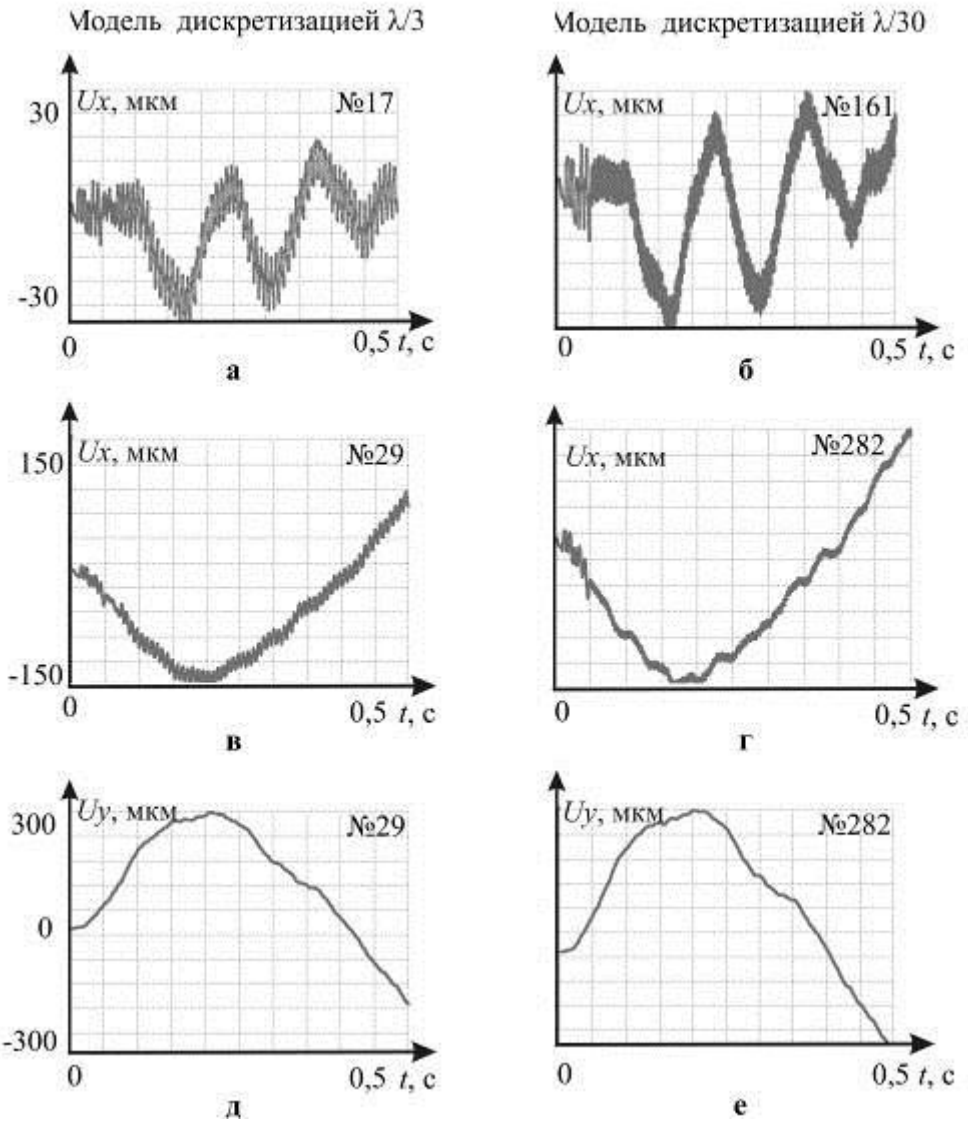


Рисунок 3.4 – Сравнение результатов расчета моделей с разной пространственной дискретизацией

а, в, д – перемещения узлов модели с дискретизацией $\lambda/3$

б, г, е – перемещения узлов модели с дискретизацией $\lambda/30$

Анализ рисунка 3.4 показывает, что при характерном размере элемента $\lambda/3$ огибающая функции перемещения более размыта, чем при характерном размере элемента $\lambda/30$ (огибающая функции имеет более четкий контур).

В следующей модели импульс приложен не в виде меандра, а в виде «пилы». Рассмотрим Модель 5, с прогибом от собственного веса и веса ударника на конце. Модель 5 – это стержень при вбивании его в грунт с помощью ударника. Интерес представляют динамические процессы, происходящие при его вбивании. В стержне возникают колебания, анализ которых и будет приведен

ниже. Форма прикладываемых импульсов для Модели 5 представлена на рисунке 3.5 а. Модуль силы получен с помощью приближенного расчета, с использованием энергетических характеристик процесса [28]. Результаты расчета Модели 5 представлены на рисунке 3.5 б, в, г для узлов на трех разных участках модели, так же, как и для Модели 3. Первоначальной задачей было определение оптимального расположения опор, при котором максимальный прогиб не должен был превышать 20 см. Данная Модель 5 позволяет также оценить вертикальные смещения модели при забивании ее в грунт.

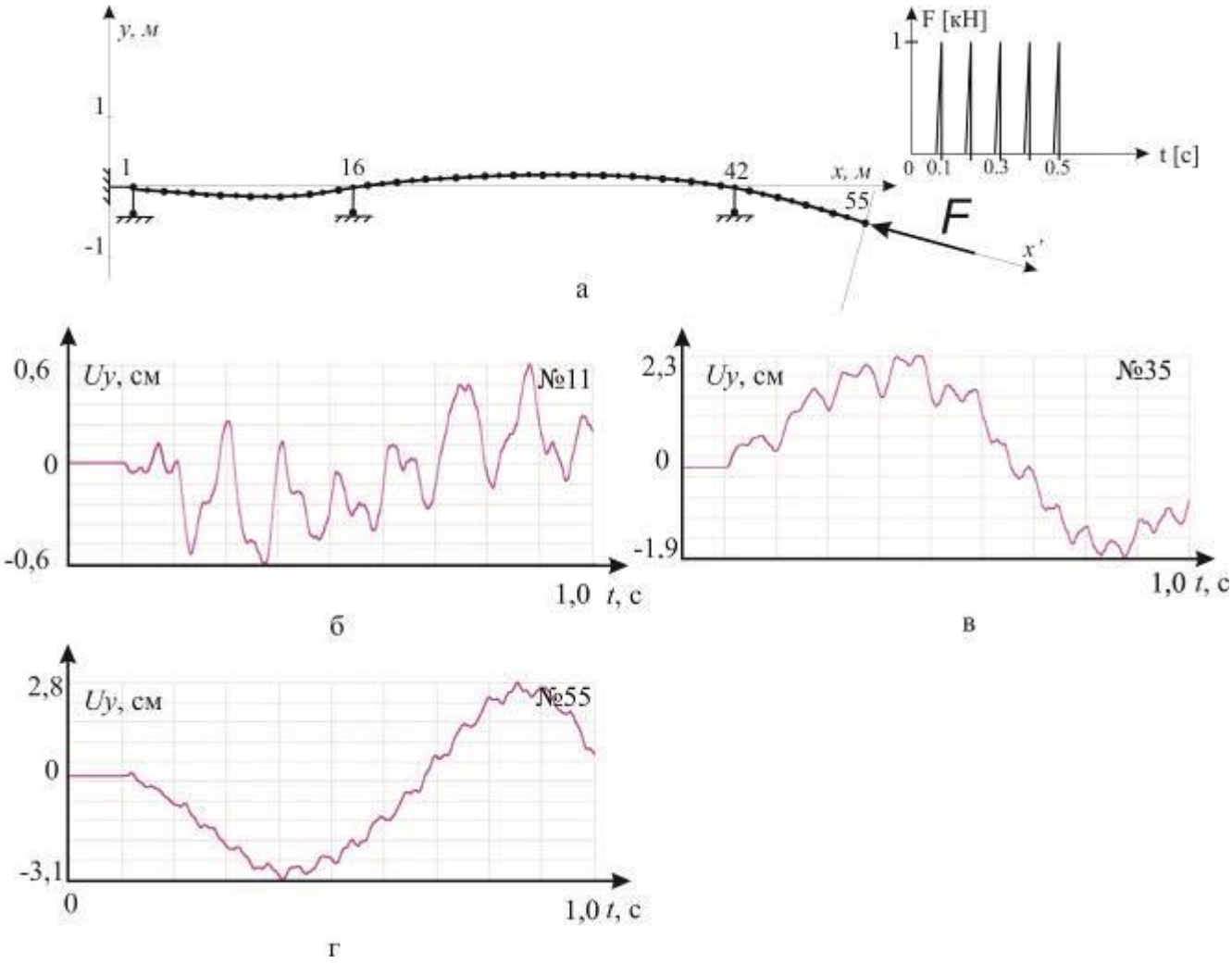


Рисунок 3.5 – Результаты расчета Модели 5 с криволинейной геометрией стержня.

а – граничные условия Модели 5, б – зависимость перемещения U_y узла 11 от времени, в - зависимость перемещения U_y узла 35 от времени,

г - зависимость перемещения U_y узла 51 от времени

При анализе отклика численной Модели 5 на пять ударов, максимальные смещения по вертикальной оси *y* в неподвижной системе координат достигали значений 3 см в крайнем узле 55 (рисунок 3.5, г). В узле 35 (рисунок 3.5 в) максимальные смещения по оси *y* достигали 2 см, в узле 11 (рисунок 3.5, б) на ближнем к заделке участке – 6 мм. Величина перемещений по оси *x* в неподвижной системе координат достигает от 12 мм в крайнем правом узле до десятых долей миллиметров вблизи жесткой заделки. Таким образом, перемещения Модели 5 по вертикальной оси не критичны и не превышают 1 % от длины участка.

Результаты расчета для модели с учетом собственного веса позволяют прогнозировать вертикальные перемещения реального стержня при воздействии на него ударного устройства. Получены динамические отклики модели в разных узлах.

Как показано на данном примере, подобный алгоритм позволяет проводить усовершенствование существующих методов аналитического и неразрушающего контроля природной среды, материалов и изделий любой геометрии, в том числе сложной.

Частота собственных колебаний закрепленного на одном конце стержня длиной 10 м была рассчитана по формуле [52]:

$$\omega = \left(\frac{E}{\rho}\right)^{\frac{1}{2}} \cdot \frac{\pi}{l} \cdot (2n+1) \qquad (3.5)$$

В таблице 3.3 в соответствии с формулой (3.3) посчитаны первые пять собственных частот ω (круговая частота), f – частота колебаний, T – период собственных колебаний. Расчет произведен для стержня с физико-механическими параметрами стали, длиной 10 м, рассмотрено два варианта граничных условий – когда один конец закреплен, и когда оба конца закреплены.

При этом колебания узлов численной Модели 3длиной 10 м имеют период ~ 8 мс, что согласуется с (3.3). Первая собственная частота составляет ~ 8 мс, продольная акустическая волна при скорости 5200 м/с проходит 10 м за 1,9 мс, полный период колебаний в численной модели равен приблизительно 8 мс.

Таблица 3.3 – Аналитический расчет собственной частоты стержня

n	Один конец свободен, один закреплен			Оба конца закреплены		
	ω, рад/с $\cdot 10^3$	f, кГц	T, мс	ω, рад/с $\cdot 10^3$	f, кГц	T, мс
0	0,82	0,13	7,66	0	0	-
1	2,46	0,39	2,56	1,64	0,26	3,83
2	4,10	0,65	1,53	3,28	0,52	1,91
3	5,74	0,91	1,10	4,92	0,78	1,28
4	7,38	1,18	0,85	6,56	1,05	0,96
5	9,02	1,44	0,70	8,20	1,31	0,77

Предложенный алгоритм позволяет оптимизировать расположение опор для объектов, прогнозировать смещения объектов и их участков, результаты представлены для металлического стержня длиной 10 м. Такой подход позволяет увеличить безопасность техногенных объектов, предотвратить нежелательные последствия, увеличить срок службы объектов, расширить автоматизацию производственных процессов.

3.2 Численное моделирование процессов распространения волны в плоских объектах

Часто в практике неразрушающего контроля объектами выступают так называемые плоские тела, у которых один из размеров существенно мешьше двух других. Контролируемые методом АЭ сосуды под давлением так же рассматриваются как криволинейные плоские тела. Для отработки методики распространения волны в плоском теле были решены тестовые задачи. Рассмотрим особенности распространения плоской волны, падающей на объект контроля по нормали при различных граничных условиях (Модель 6 и Модель 7). Первая модель пластины (Модель 6) показана на рисунке 3.6 а. Ее размеры и основные характеристики приведены в таблице 3.4. Для моделирования плоских тел использованы SHELL3 – трехузловые элементы тонкостенной оболочки.

Таблица 3.4 – Параметры моделей плоских тел

	Длина, L, м	Ширина, H, м	Размер элемента, м	Колич. элементов	Колич. узлов	Тип элементов	Сила, F, кН	Длительность импульса
Модель 6	1	1	$5\cdot10^{-2}$	800	441	SHELL3	1	$1\cdot10^{-5}$
Модель 7	1	1	$5\cdot10^{-2}$	800	441	SHELL3	1	$1\cdot10^{-5}$
Модель 8	1	0,5	$5\cdot10^{-2}$	418	240	SHELL3	1	$1\cdot10^{-3}$
Модель 9	1	0,5	$5\cdot10^{-2}$	418	240	SHELL3	1	$1\cdot10^{-3}$
Модель 10	1	0,5	$5\cdot10^{-3}$	40 000	20301	SHELL3	1	$1\cdot10^{-5}$
Модель 11	1	0,5	$5\cdot10^{-2}$	1360	787	SHELL3T	0,010	$1\cdot10^{-3}$
Модель 12	1	1	0,1	1000		SHELL3T	1	$1\cdot10^{-3}$
Модель 13	1	1	0,1	1000		SHELL3T	1	$1\cdot10^{-3}$

Для Модели 6 заданы физико-механические свойства стали. Нагрузка приложена в виде импульса силы длительностью $1\cdot10^{-5}$ с, приложенного по правой грани в каждом узле модели. Граничные условия - запрет перемещений U_y по нижней грани модели в каждом узле, что показано на рисунке 3.6 а. На рисунке 3.6 б, в представлены распределения перемещений U_x в модели в моменты времени 40 и 100 мкс. Виден волновой фронт, продвигающийся к левой грани. Также на рисунке привеждена шкала перемещений U_x.

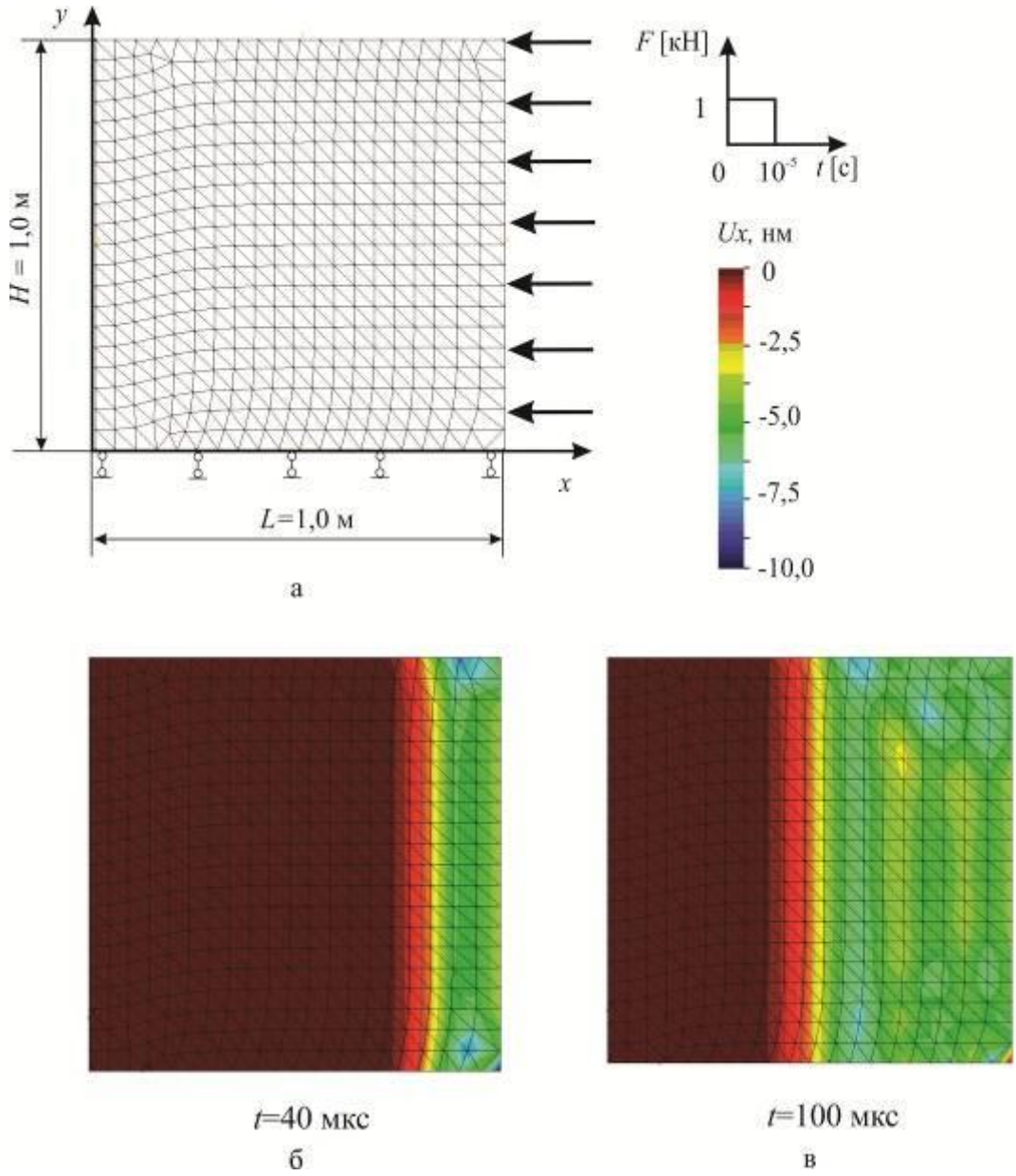


Рисунок 3.6 – Результаты расчета плоской Модели 6

а – граничные условия Модели 6; б, в – распределение перемещений U_x Модели 6 в разные моменты времени

Теоретическая скорость распространения продольной волны составляет 5200 м/с, тогда до середины Модели 6 фронт плоской волны должен доходить за 100 мкс. Оценка скорости распространения волнового фронта показывает, что скорость распространения волны в численной модели была близка к теоретической. Волновой фронт в момент времени t =40 мкс проходит четверть модели, а в момент времени t =100 мкс проходит середину модели.

Следующая Модель 7 отличалась от Модели 6 только граничными условиями (см. рисунок 3.7 а).

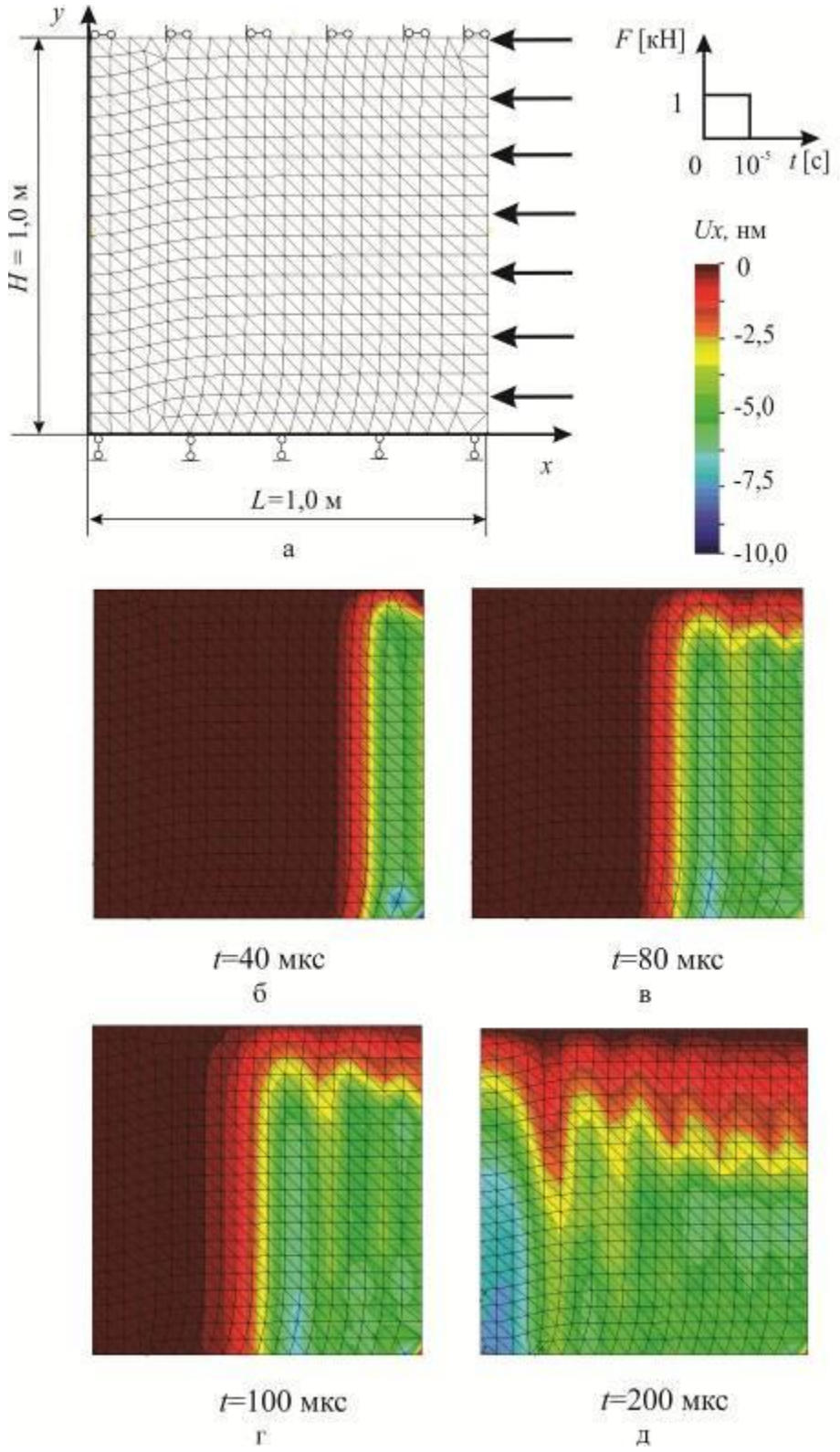


Рисунок 3.7 – Результаты расчета Модели 7 с дополнительными граничными условиями. а – граничные условия Модели 7;

б, в, г, д – распределение перемещений U_x в Модели 7 в разные моменты времени

Дополнительно по верхней грани задан запрет перемещений по оси *x*. Появление дополнительных ограничений по верхней грани в Модели 7 привело к возникновению переотражений аккустической волны и к существенному изменению поля перемещений U_x по всей пластине.

В сравнении с Моделью 7 Модель 6, имеющая свободную верхнюю грань, пропускает волновой фронт равномерно, тогда как в Модели 7 по верхней грани происходят эффекты переотражения. Данные тестовые эксперименты доказывают влияние граничных условий в моделях и позволяют делать выбор при численном моделировании в пользу тех или иных численных моделей. Так же, как и для Модели 6, для Модели 7 скорость распространения волны в пластине согласуется с теоретиченским расчетом. Волновой фронт в момент времени t=100 мкс проходит середину модели, в момент времени t=200 мкс доходит до противоположной грани и отражается от нее.

Далее рассмотрим особенности распространения акустической волны в плоском объекте контроля при точечном воздействии силы F, направленной сначала по касательной к боковой грани (Модель 8), а затем по нормали (Модель 9). Такое точечное приложение силы F приводит к возникновению сферической волны. Граничные условия и геометричные размеры Моделей 8 и 9 представлены соответственно на рисунке 3.8 а и рисунке 3.9 а, их характеристики даны в Таблице 3.4.

Результаты расчета в программе представлены на рисунках 3.8 и 3.9.

Нагрузка для Моделей приложена в виде импульса длительностью 10^{-3} с. Шаг дискретизации по времени составил 10^{-5} с.

В момент времени t=40 мкс (см. рисунок 3.8 б) под воздействием нагрузки в модели формируется две зоны деформаций с разными знаками, при этом нагрузка продолжает свое действие, в момент времени t=80 мкс (см. рисунок 3.8 в) зона локальных деформаций увеличивается. В момент времени t=140 мкс (см. рисунок 3.8 г) волна начинает распространяться в модели с учетом особенностей граничных условий. В момент времени t=180 мкс (см. рисунок 3.8 д) фронт волны доходит до противоположной (левой) грани. Данный результат, полученный в

численной модели хорошо согласуется с теоретической оценкой. При этом задний фронт импульса продолжает действовать.

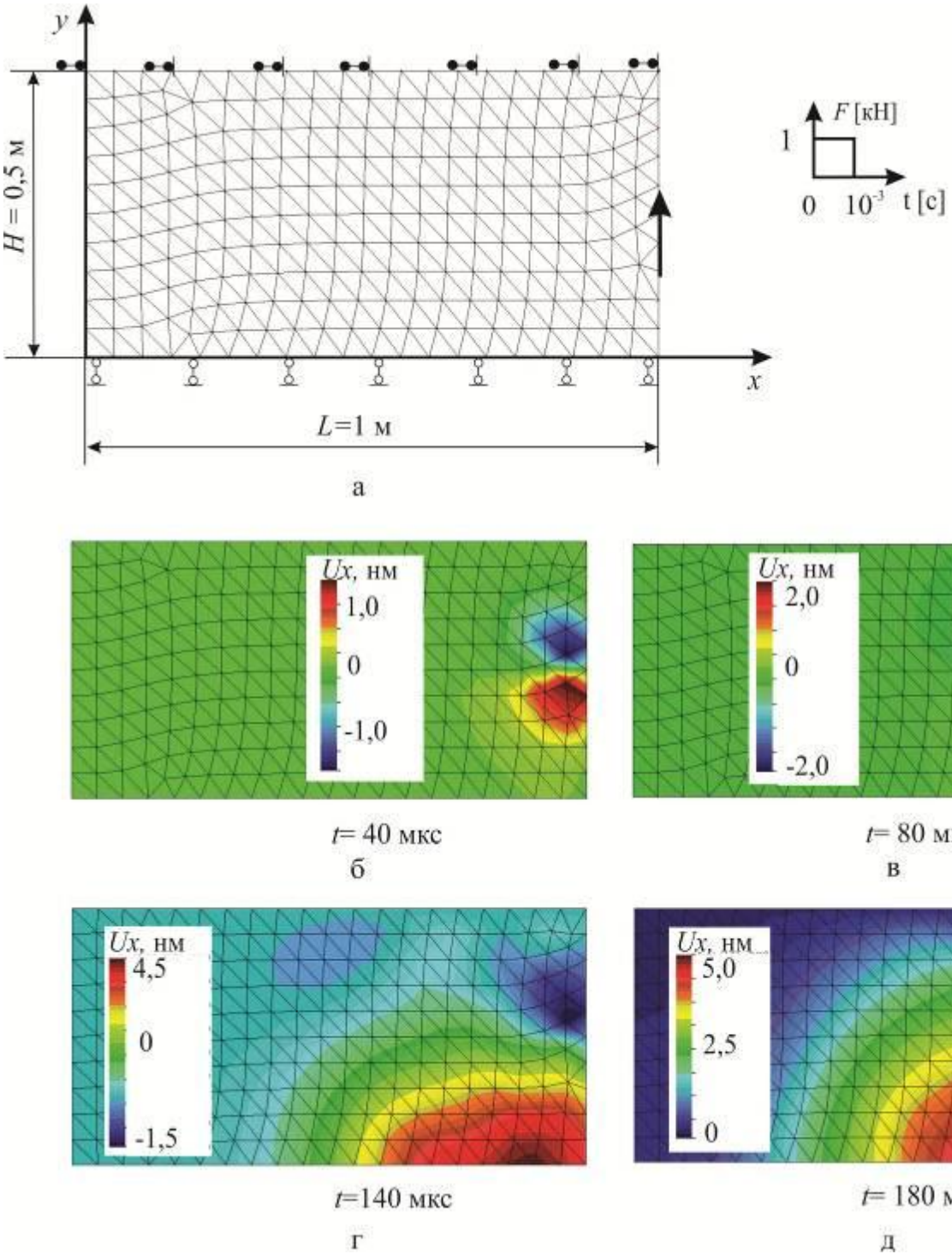


Рисунок 3.8 – Результаты расчета Модели 8 в разные моменты времени

а – граничные условия Модели 8

б, в, г, д – распределение перемещений U_x в Модели 8 в разные моменты времени

Следующая Модель 9 (см. рисунок 3.9 а) имела нагрузку, приложенную по оси *x* (горизонтально). Такое приложение силы приводит к возниконовению сферической волны, как и в предыдущей Модели, однако другой направленности.

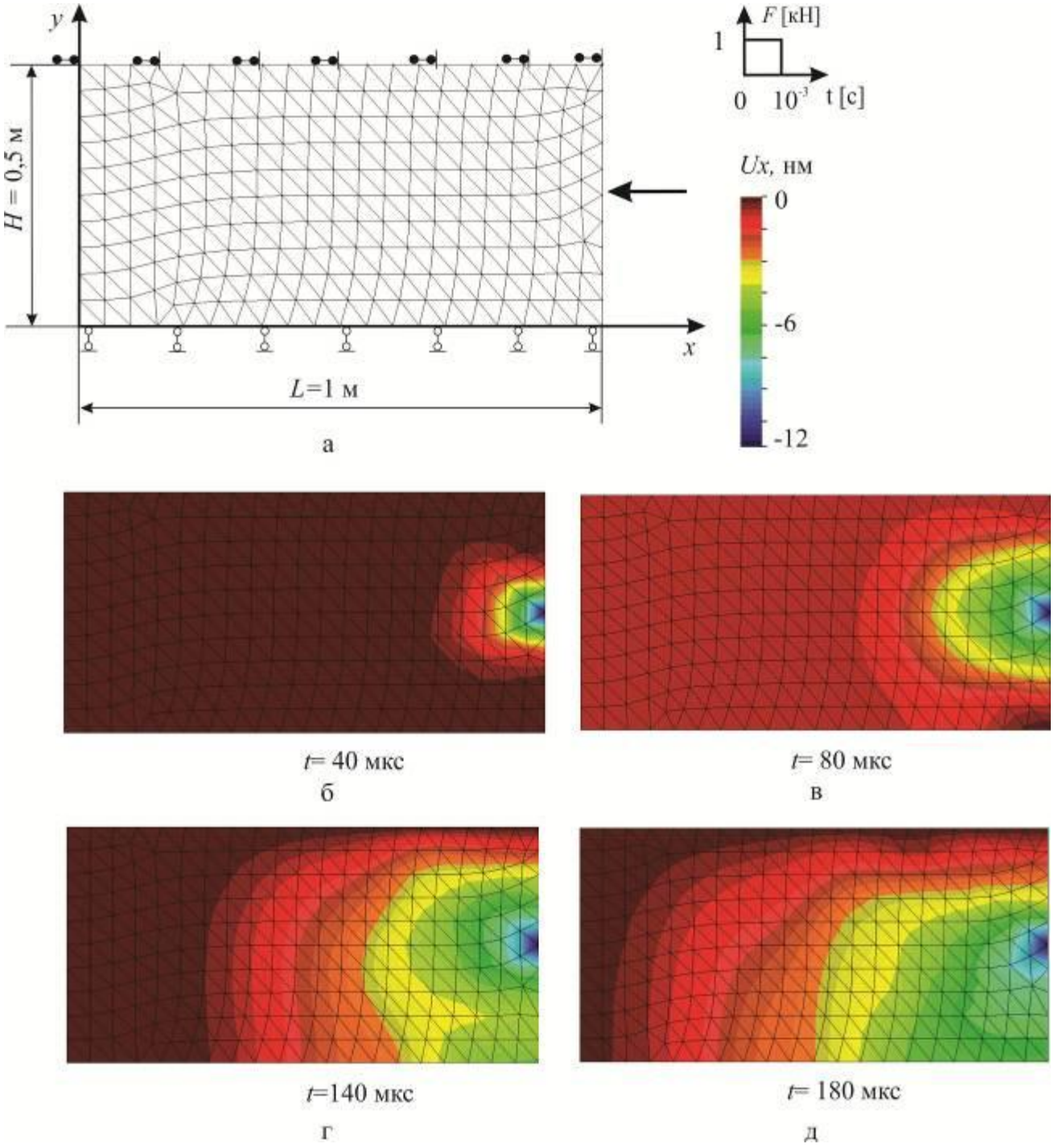


Рисунок 3.9 – Распределение перемещений U_x Модели 9 в разные моменты времени

а – граничные условия Модели 9; б, в, г, д – распределение перемещений U_x в Модели 9 в разные моменты времени

В момент времени t=40 мкс (см. рисунок 3.9 б) под воздействием нагрузки в модели формируется зона локальных деформаций, действие нагрузки продолжается, в момент времени t=80 мкс (см. рисунок 3.9 в) нагрузка продолжает действовать и зона локальных деформаций увеличивается, так же, как и в Модели 9. В момент времени t=140 мкс (см. рисунок 3.9 г) задний фронт прекращает действие, волна упругости распространяется в модели до противоположной грани. В момент времени t=180 мкс (см. рисунок 3.9 д) фронт волны доходит до левой грани.

Таким образом, при приложении силы по оси y (рисунок 3.8) распределение перемещений в начальный момент имеет диполь - две зоны деформаций, отрицательную и положительную зоны, что в конечном итоге влияет на фронт распространения волны, что может повлиять на результаты измерений в том случае, если датчик АЭ расположен в ближней зоне. Второй вариант приложения порождающей АЭ сигнал силы – по горизонтальной оси x, в этом случае скорость волны больше, и фронт имеет центр и распространяется в виде сферы (рисунок 3.9). Данные результаты показывают различие при моделировании продольной и поперечной волны на плоских объектах неразрушающего контроля.

Для Моделей 6, 7, 8, 9, 10 густота сетки составляла от $\lambda/2$ до $\lambda/10$, при наибольшей частоте акустической волны 100 кГц. Результаты расчета приведены на рисунке 3.10, при этом даны перемещения U_x, в фиксированной цветовой шкале от 2 до $-2\cdot10^{-9}$ м, малые перемещения обусловлены амплитудой приложенной силы. Учитывая геометрические размеры модели (метровый диапазон), свойства стали, столь малые перемещения обоснованы.

Рисунок 3.10 показывает, что модели с пространственной дискретизацией равной $\lambda/10$ способны очень подробно анализировать процесс распространения, при этом погрешность расчета уменьшается, фронт волны продольных перемещений U_x становится более четким, можно проводить более детальный анализ. Анализ влияния граничных условий на процесс распространения волны показывает, что модели с использованием предлагаемых алгоритмов реагируют

на различные граничные условия. В момент времени t =40 мкс (см. рисунок 3.10 б) импульс уже не действует.

В момент t=40 мкс фронт распространения волны еще полностью симметричный. При t=80 мкс (рисунок 3.10 в) волновой фронт отражается от верхней грани. Нижняя грань имеет запрет перемещений по оси y, продольная волна (с характерными перемещениями в направлении распространения) распространяется вдоль нее свободно.

На рисунках 3.10 б-ж также хорошо видна волна, распространяющаяся вдоль правой свободной поверхности, в момент времени t=80 мкс (рисунок 3.10 в) волна доходит до верхнего и нижнего правых углов модели, в момент времени t=120 мкс (рисунок 3.10 г) волна отражается от свободных поверхностей и идет в обратном направлении, у нее тоже заметен сферический фронт. В момент времени t=160 мкс (рисунок 3.1 д) отраженная от углов волна на правой боковой поверхности снова приближается к середине модели. Сферические фронты сходятся, пересекаются и отражаются, волна снова расходится при t=200 мкс (рисунок 3.10 е, ж) к верхней и нижней граням.

Продольная волна к моменту времени t = 200 мкс (рисунок 3.10 е) доходит до левой свободной грани и отражается от нее. В момент времени t = 240 мкс (рисунок 3.10 ж) продольная волна распространяется в обратном направлении. Анализ модели показывает возможность распространения упругих волн деформаций в частотном диапазоне от 100 кГц в плоских объектах неразрушающего контроля.

В большинстве случаев объекты неразрушающего представляют из себя тела с неоднородностями структуры, формы, состава. Для обеспечения решения задач неразрушающего контроля распространения упругих волн деформаций в неоднородных телах, была рассмотрена Модель 11 с геометрическим концентратором.

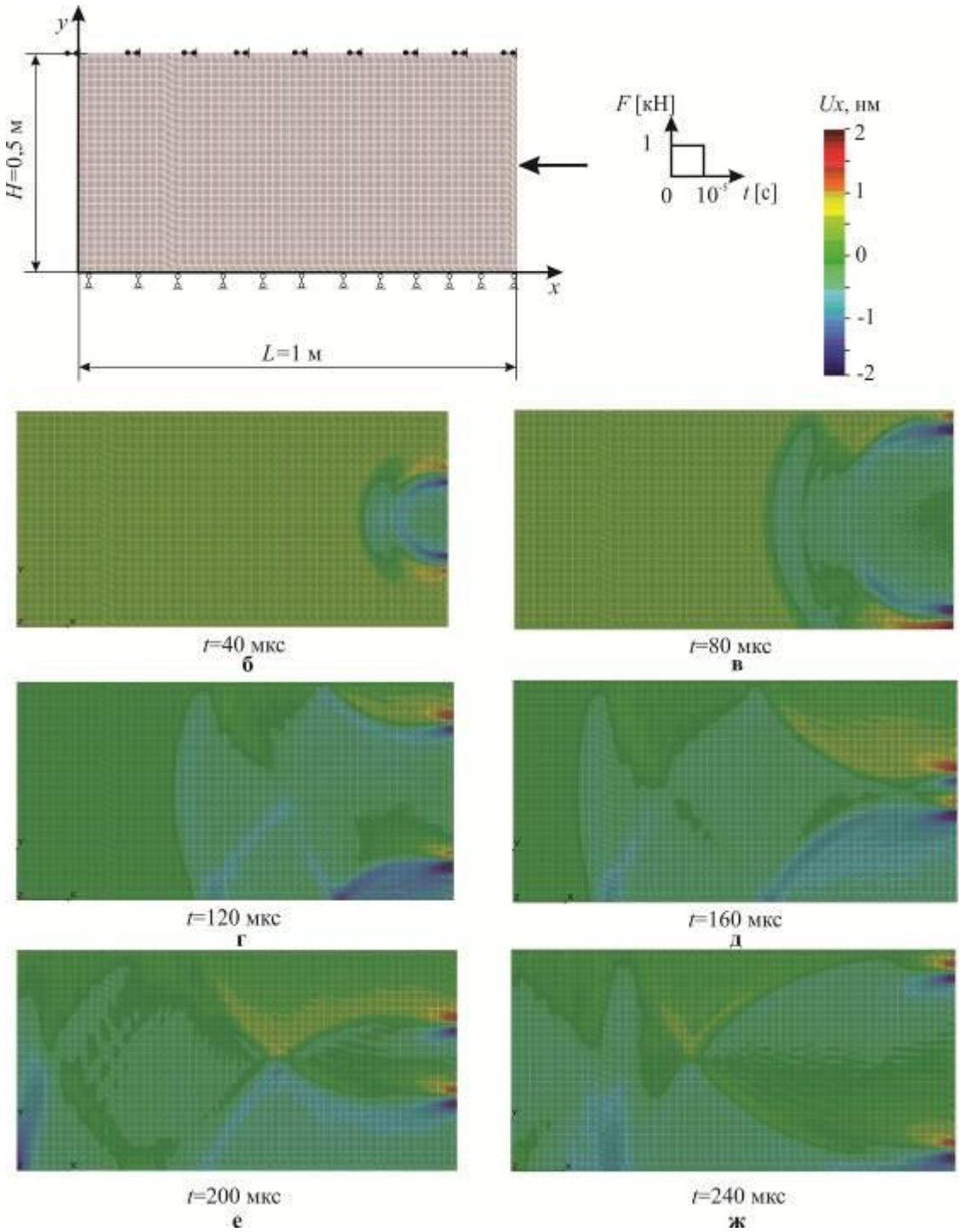
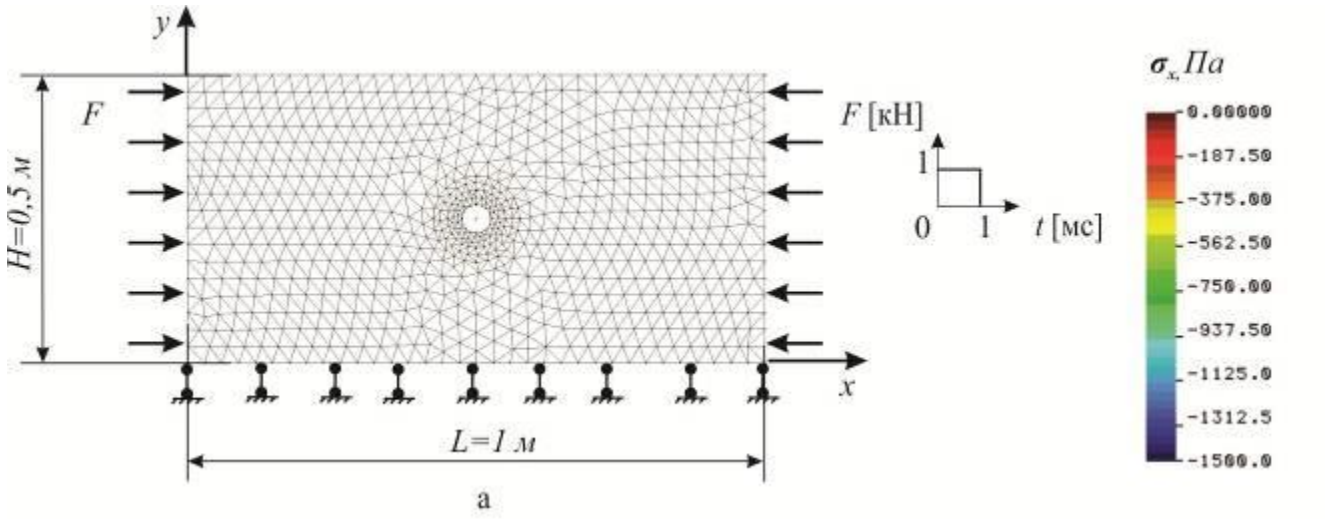


Рисунок 3.10 – Распределение перемещений U_x модели 10 в разные моменты времени

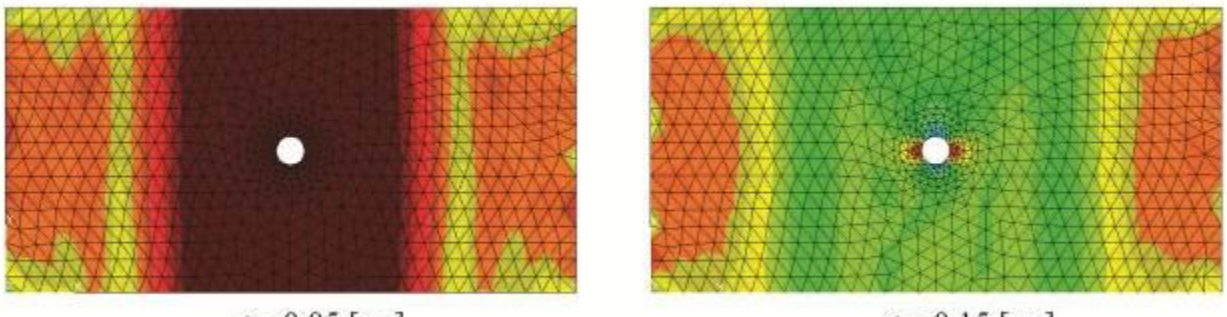
а – граничные условия Модели 10; б, в, г, д – распределение перемещений U_x в Модели 10 в разные моменты времени

Модель 11 представлена на рисунке 3.11, концентратором диаметром 5 см находится в середине модели. Таким образом, Модель 11 может описывать поведение акустической волны вблизи поры, раковины, несплошности.

По нижней границе Модели 11 введены ограничения по перемещениям U_y. Нагрузка приложена по обеим вертикальным граням в виде распределенной силы (10 Н в каждом узле). Нагрузка приложена в виде импульса длительностью 10^{-3} с, при этом характерный (максимальный) размер SHELL3T-элементов составляет 7 см, что согласуется с общепринятым ограничением по размерам элементов [113]. Расчетный шаг по времени для этой модели Δt равнялся 100 мкс. Вблизи геометрического концентратора для обеспечения точности решения густота конечно-элементной сетки была увеличена (рисунок 3.11 а).



а



$t = 0{,}05$ [мс]

б

$t = 0{,}15$ [мс]

в

Рисунок 3.11 – Распространение волнового импульса в Модели 11

а – конечно-элементная модель и граничные условия,

б – изолинии σ_x через $t = 0{,}05$ мс после удара,

в – изолинии σ_x через $t = 0{,}15$ мс после удара

На рисунке 3.11, б, в представлены напряжения σ_x в моменты времени 0,05 и 0,15 мс соответственно. Цвета даны в единой шкале от 0 до минус 1500 *Па*. Прослеживается фронт распространения волнового импульса. Волновой импульс от обеих граней доходит до четверти модели за 0,05 мс (рисунок 3.11 б). По теоретическим подсчетам продольная волна идет с известной скоростью 5200 м/с и доходит до четверти модели (0,25 м) за время, равное 0,048 мс (для самой быстрой моды). Таким образом, результаты численного расчета (рисунок 3.11 в) совпадают с теоретической оценкой.

Акустические волны со стороны боковых граней проходят ¾ модели и огибают концентратор за время 0,15 мс (рисунок 3.11 в). В середине модели происходит сложение волн, вблизи отверстия наблюдается эффект концентрации напряжений. Коэффициент концентрации напряжений σ_x составляет ~3, что удовлетворительно согласуется с теоретическим решением задачи Кирша [92].

Кроме несплошностей типа пор или раковин, наиболее опасными для объектов, работающих в условиях циклических напряжений, являются трещины. Коэффициент концентрации напряжений вблизи вершины трещины может достигать экстремальных значений, при этом зона около вершины начинает работать в области пластических деформаций, что может привести к быстрому росту трещины и последующему разрушению конструкции. Своевременное обнаружение активно растущих трещин способствует увеличению безопасности техногенных объектов и срока из службы. Для исследования объектов с такого рода концентраторами были созданы численные Модели 12 и 13. Продвижение трещины в реальной модели представляет собой разрыв атомарных связей и освобождение квантиля энергии. В численной модели данный процесс был смоделирован приложением силы в узле модели в виде импульса F_y (рисунок 3.12 а). Рассматривалась Модель 12 размерами 1×1 м с трещиновидным концентратором (рисунок 3.12, б). Величина силы составила 1 кН, длительность импульса составляла 0,1 мс.

Описанное выше предположение основано на следующем приближении: пусть структура тела является плоской решеткой. Аналогичная модель трещины

была рассмотрена также в [63]. Прямые разорванные линии обозначают на рисунке 3.12 а разорвавшиеся связи. Трещина распространяется справа налево. Такое представление тела в виде решетки с упругими связями позволяет смоделировать дискретный характер импульсов акустической эмиссии. Таким образом, на первом этапе процесса разрушения, разрывается всего одна атомная связь, которая приводит к распространению продольной волны вдоль ранее существовавшей связи. Также возникает поперечная волна, распространяющаяся перпендикулярно данной связи и рэлеевская волна, также распространяющаяся перпендикулярно связи, но в противоположном поперечной направлении.

Закрепление модели осуществлено по двум граням: на левой запрещены перемещения и повороты (жесткая заделка), на нижней запрещены перемещения по вертикальной оси (рисунок 3.12 б). Расчетное время прихода акустической волны от источника до заделки составило ~ 0,19 мс. За время 0,1 мс волна должна проходить половину пути до левой грани. Численные и теоретические результаты совпадают. Поля горизонтальных перемещений U_x представлены на рисунке 3.12 в.

Модель 13 имеет такие же граничные условия, как и Модель 12, однако форма вершины трещины представляет из себя овал с радиусом скругления, равным 2 мм, раскрытие трещины равно 7 см (рисунок 3.13 а). На данной модели изучается влияние формы трещины в конечно-элементной модели на конечный отклик при моделировании волновых процессов. В вершине трещины приложена сосредоточенная сила в виде импульса длительностью $0{,}1 \cdot 10^{-3}$ с (рисунок 3.13 а). Величина силы такая же, как и для Модели 12, равна 1 кН. Приведены поля горизонтальных перемещений U_x (рисунок 3.13 б, в).

Модель 13 иллюстрирует распространение сигнала АЭ от подрастания трещины вблизи вершины геометрического концентратора.

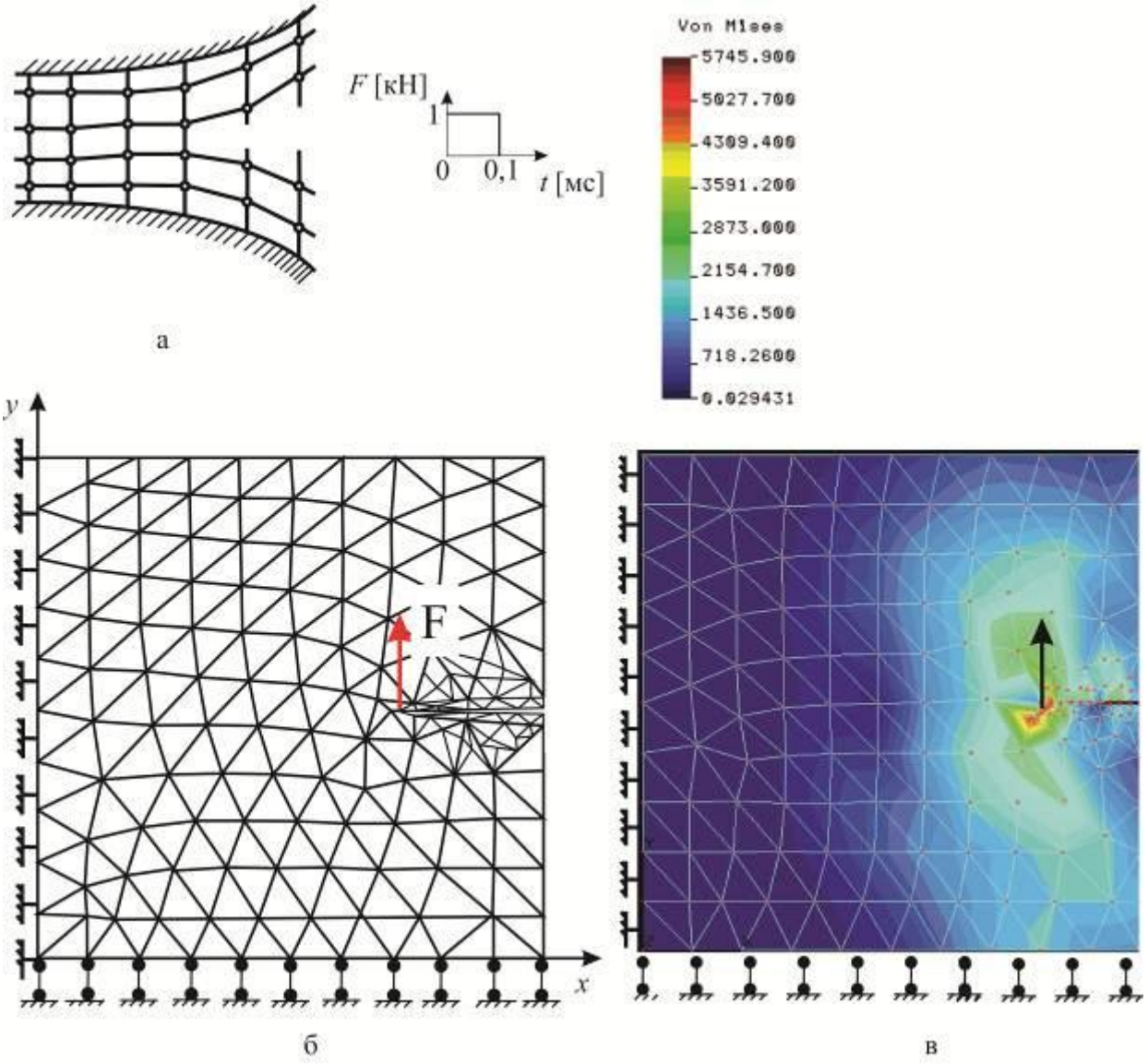


Рисунок 3.12 – Результаты конечно-элементного моделирования распространения акустической волны в Модели 12 с дефектом в виде трещины с острой вершиной

а – модель трещины, б – конечно-элементная модель,

в – результаты численного расчета (напряжения Von Mises) распространения акустической волны в модели от подрастания трещины в момент времени t=0,1 мс

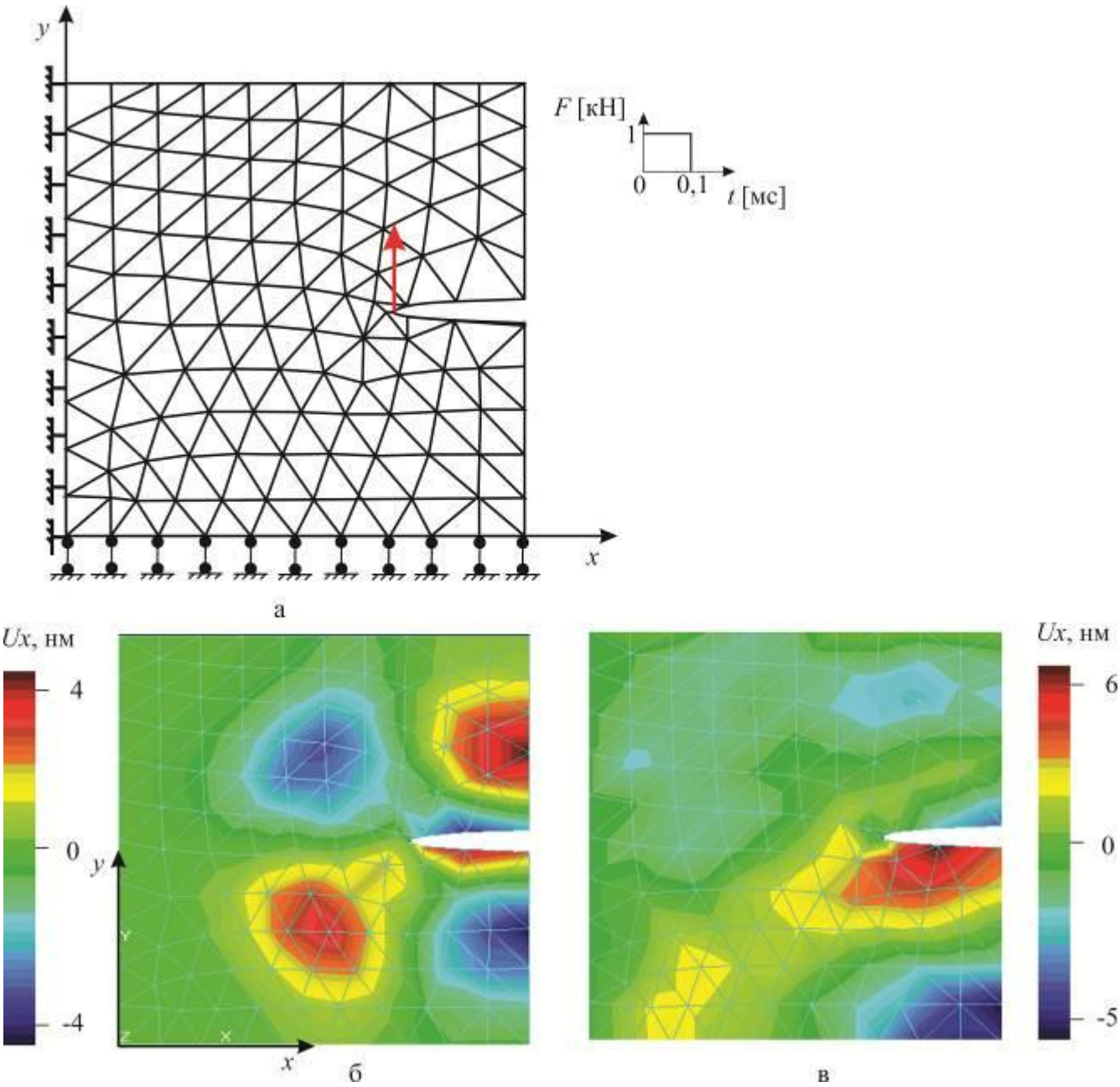


Рисунок 3.13 – Результаты конечно-элементного моделирования распространения акустической волны в Модели 13 с дефектом типа трещина с вершиной с заданным радиусом скругления

а – граничные условия Модели 13, зависимость силы F от времени

б – изолинии U_x через t = 0,1 мс после удара,

в – изолинии U_x через t = 1 мс после удара.

Можно сделать вывод, что конечная форма трещины и моделирование ее геометрических размеров не влияет на форму, направление распространения фронта акустической волны в модели на больших расстояниях. Хотя на

начальном этапе распределение перемещений U_x для Моделей 12 и 13 отличается. В Модели 13 присутствуют 4 «лепестка».

По результатам вышеописанных численных экспериментов можно сделать вывод, что программном комплексе COSMOS/M есть возможность моделировать различные фронты волн – плоский фронт волны возникает при приложении нагрузки по кромке (грани), в нескольких узлах подряд. Для моделирования сферического фронта волнового пакета в программном комплексе COSMOS/M следует использовать точечное приложение нагрузки.

3.3 Численное моделирование процессов преломления волн на границе раздела двух сред

Решение тестовых задач с концентраторами напряжений в виде полостей и трещин показывает хорошую сходимость результатов для распространения различных типов волн при анализе скорости волны.

На практике при неразрушающем контроле природной среды, веществ, материалов и изделий однородных объектов очень мало, чаще встречаются объекты, в которых физические и механические параметры материала изменяются в различных зонах. Далее рассмотрим процесс распространения акустической волны через границу двух сред, отличающихся по своим физико-механическим параметрам.

Модель 14 состояла из двух слоев: слоя стали и слоя меди, ось x^* – граница раздела сред (показана на рисунке 3.14 а). Для модели использовались элементы типа SHELL6T. Пусть плоская продольная волна, генерируемая преобразователем, выходит на грань ВС по нормали. Длина волны λ для Модели

14 представлены на рисунке 3.14 а. Физические свойства стали и меди двух слоев взяты из таблицы 3.2

Сила *F* зависит от времени так, как показано на рисунке 3.14 а. Воздействие силы приводит к возникновению акустической волны в объекте контроля. Импульс силы такой длительности порождает высокочастотную акустическую волну, и для расчета процесса ее распространения требуется высокий шаг дискретизации по времени при расчете задачи и сравнительно малый размер элемента модели [91]. При численном моделировании распространения ультразвуковой волны мегагерцового диапазона критический размер элемента должен быть не более 0,2 мм [89].

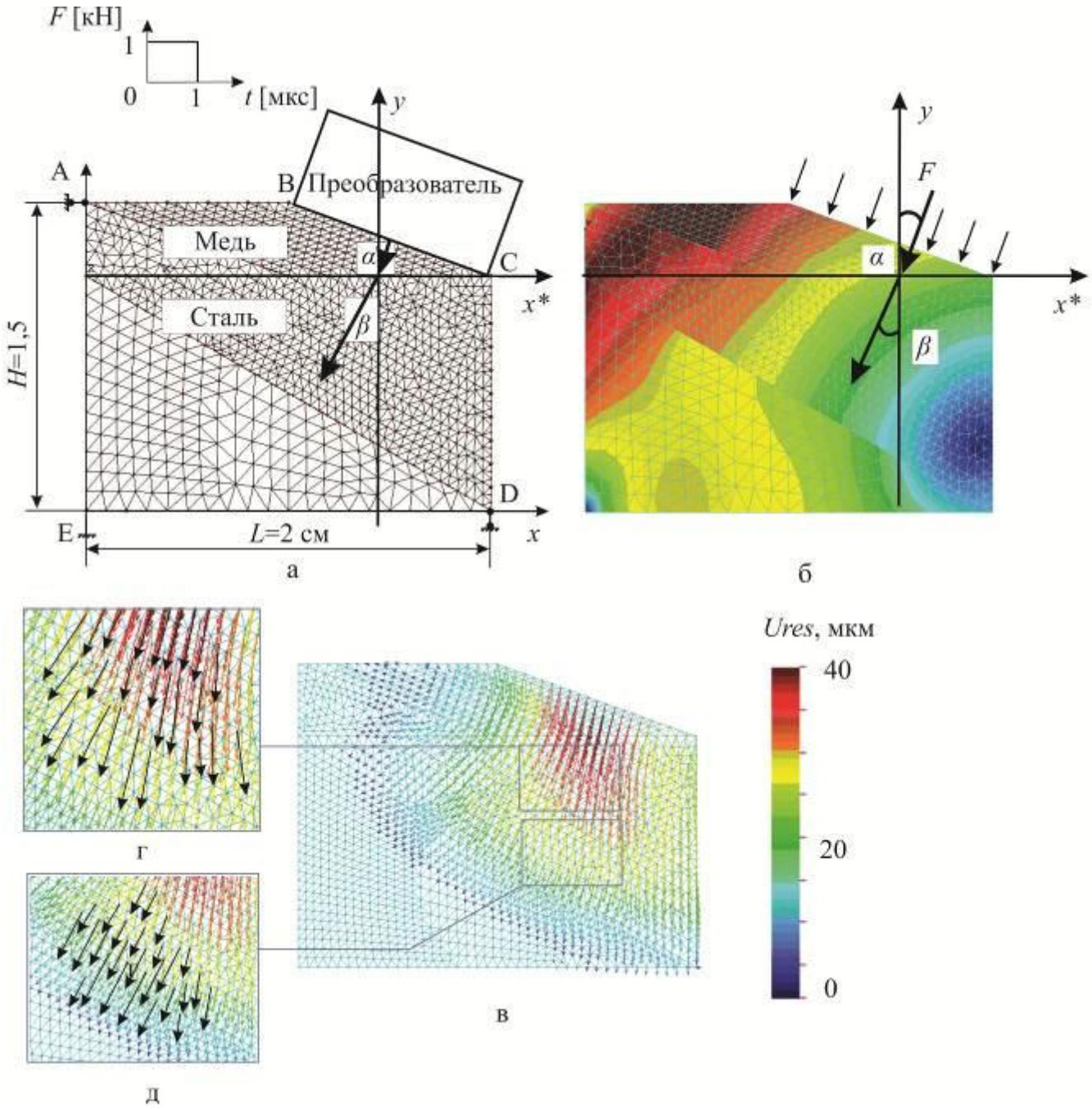


Рисунок 3.14 – Модель 14 с границей раздела сред.

а – граничные условия; б – поле перемещений U_{res} Модели 14 в момент времени t=2,0 мкс; в – векторы результирующих перемещений U_{res} Модели 14 в момент времени t=2,0 мкс; г – буферная зона;

д – направление векторов после преломления.

Плоский фронт акустической волны начинает распространяться от преобразователя в верхнем слое пластины, преломляется на границе раздела сред и переходит в нижний слой.

На границе раздела двух сред с разными механическими свойствами происходит преломление волны по законам геометрической акустики, и фронт плоской волны должен изменять свое направление согласно закону Снеллиуса:

$$\frac{c_{l1}}{\sin\alpha} = \frac{c_{l2}}{\sin\beta} \tag{3.6}$$

где α – угол ввода акустических колебаний, β – угол распространения акустической волны во втором слое после преломления, c_{l1} и c_{l2} – скорости продольной волны в верхнем (медь) и нижнем (сталь) слое модели.

Из расчета по формуле Снеллиуса:

$$\beta = \arcsin\frac{c_{l2}\cdot\sin\alpha}{c_{l1}} = \arcsin\frac{5200\cdot\sin 20^\circ}{3500} \approx 30^\circ \tag{3.7}$$

В верхний слой данной Модели волна вводится под углом α = 20°, и, согласно решению (3.6), в нижнем слое волна распространяется под углом β = 30°. Верхний и нижний слой численной Модели 14 разбит на подобласти (Surfaces).

Согласно рекомендациям [83, 87, 90] для численного моделирования волновых процессов, расчетный шаг интегрирования с учетом длительности импульсного воздействия должен быть не более $5\cdot10^{-8}$ с. На рисунке 3.14 б представлена картина изолиний результирующих перемещений U_{res} в момент времени 2,0 мкс, когда упругая волна уже проходит границу сред.

Для корректного анализа распространения волны в таком небольшом объекте, задний фронт не должен интерферировать с передним. Импульс прекращает свое действие в момент, когда акустическая волна проходит половину верхнего слоя, поэтому эффекты, связанные с действием заднего фронта импульса, исключаются.

Картина векторов перемещений узлов в момент времени 2,0 мкс представлена на рисунке 3.14 в.

Результаты численного эксперимента согласуются с решением (3.6) – после прохождения переходной зоны результирующие векторы перемещений в нижнем

слое Модели 14 совпадают с ожидаемым направлением распространения. Векторы ориентированы под углом 30°, что согласуется с аналитическим решением.

Важным для анализа процесса преломления волны является наличие буферной (переходной) зоны. Протяженность переходной зоны, в которой векторы результирующих перемещений разнонаправлены, соизмеримо с длиной волны, что видно на рисунке 3.14 г. В пределах этой зоны векторы имеют разное направление, и только далее они выстраиваются в ориентированный фронт плоской волны, показанный на рисунке 3.14 д. Полученные результаты размеров буферной зоны могут быть использованы для учета ограничений численного метода.

Кроме того, численная модель позволяет анализировать также скорость колебаний, что может быть использовано для оценки дисперсии скорости акустических волн, связанной со структурой материала [5,6].

Численный подход применим для более сложных (многослойных) изделий и веществ. При этом следует оптимизировать конечно-элементную сетку с учетом реальных размеров объектов неразрушающего контроля и принимать во внимание ограничения метода – пространственную и временную дискретизацию, переходные зоны.

Следующей моделью служила многослойная модель сварного стыка рельса. При сварке свойства свариваемых материалов значительно изменяются, что приводит к формированию зон с разными физико-механическими характеристиками по длине рельса. Скорость звука на таких участках отличается от скорости в основном металле до 5%.

На рисунке 3.15 показана модель, на которой изучается процесс прохождения акустической волны сварного стыка рельса. Анализ существующих методик ультразвукового контроля сварного стыка рельса показал, что при расстановке датчиков дисперсия механических свойств стали вдоль рельса не учитывается, поэтому появляется погрешность Δ для координаты приемника. Это показано схематически на рисунке 3.15 а. Штриховыми линиями (1) показан путь, который принимается для расчетных схем в методиках ультразвукового контроля. Линиями (2) показан действительный путь ультразвукового луча, который испытывает

преломление на границах раздела сред. Область №2 обладает отличающимися механическими характеристиками.

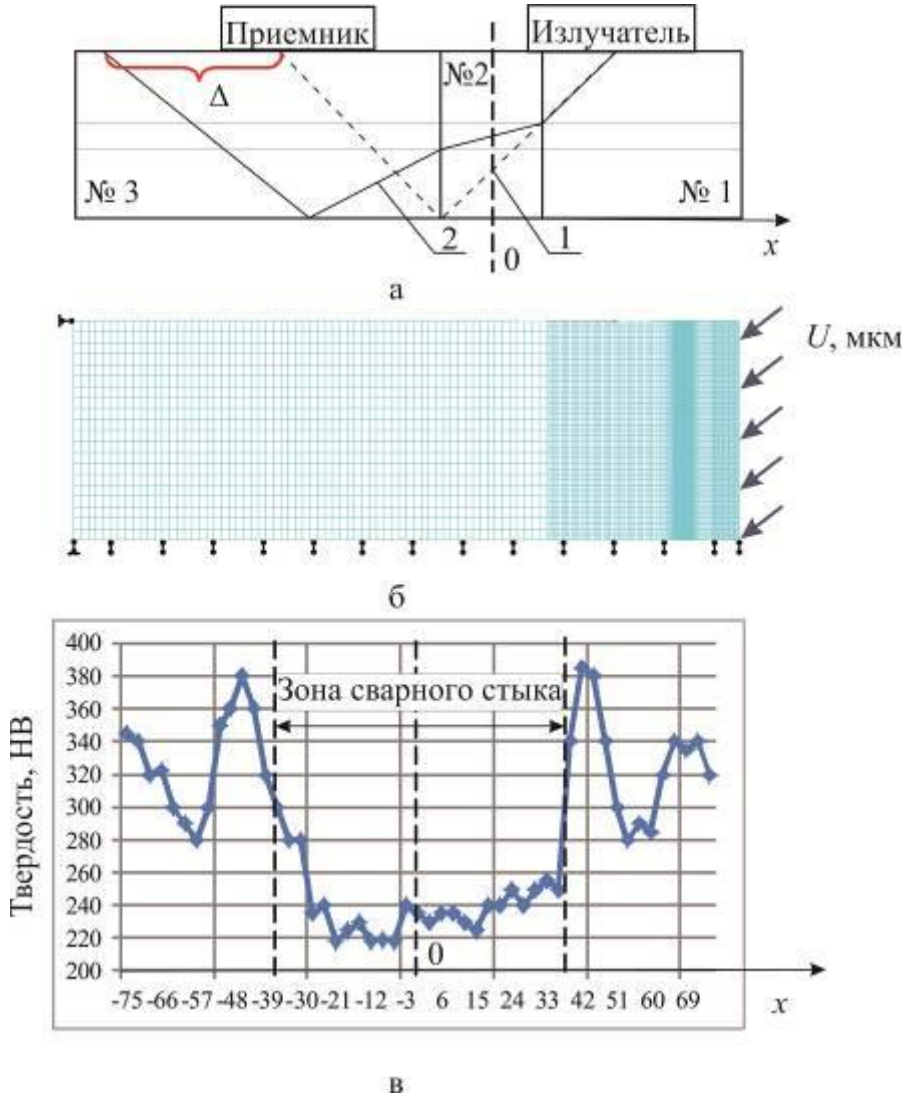


Рисунок 3.15 – Схема прохождения ультразвукового пучка при контроле рельса

а – численная модель продольного сечения рельса

б – схематичное обозначение прохождение ультразвуковой волны через сварной шов и возникающая погрешность

в – экспериментальные данные распределения твердости металла в области сварки и в основном металле

Области 1, 2, 3, на которые предложено разбить модель для того, чтобы задать различные механические свойства, представлены на рисунке 3.15 б. На рисунке 3.15 в представлены экспериментальные данные распределения твердости

металла в области сварки и в основном металле. Принимая, что НВ = $f(\sigma_m)$, можно получить значения модуля упругости и модуля сдвига для каждой области модели (где σ_m – предел текучести стали М76). Скорость звука также будет изменяться по длине рельса в соответствии с зависимостью (3.4).

Таким образом, в ходе работы были получены результаты распространения акустических волн в тестовых моделях (Модели 1-10), результаты взаимодействия акустических волн с неоднородностями в виде несплошностей, в том числе трещин (Модели 11-13), а также результаты, связанные с трансформацией акустических волн в Модели 14 с разными физико-механическими свойствами.

При разработке алгоритмического и программно-технического обеспечения процессов обработки информативных сигналов в средствах контроля значимым оказывается учет направления распространения акустических волн, их трансформация на неоднородностях (концентраторах напряжения), что было рассмотрено выше, и их трансформация, связанная со структурой материала и его физико-механическими свойствами.

3.4 Численное моделирование процесса распространения волны в объемных объектах

Несмотря на частое применение линейного и плоскостного «приближения», нередко в практике неразрушающего контроля встречаются тела объемные, поэтому актуальной становится задача локализации акустико-эмиссионных источников в таких телах.

Если ранее рассматривались простые тела – линейные и плоские, и антенна преобразователей устанавливалась заведомо известным образом, то при контроле объемных объектов возникает проблема оптимального расположения преобразователей при контроле.

Для отработки алгоритма моделирования распространения волны в объемных телах решается тестовая задача, результаты сравниваются с известным аналитическим решением.

В работе [22] получено аналитическое решение задачи о распространении акустической волны в упругом полупространстве при ударном воздействии на него сосредоточенной силы. В частности, для продольной волны U_l получено выражение для смещений вдоль акустической оси z', совпадающей с направлением удара:

$$U_l = \frac{F_0 \cdot \Delta S \gamma^2}{2\pi\mu r} \times$$

$$\times \frac{\cos\theta(1-2\gamma^2\sin^2\theta)}{(2\gamma^2\sin^2\theta-1)^2+4\gamma^3\sin^2\theta\cos\theta\sqrt{1-\gamma^2\sin^2\theta}} e^{-i(wt-k_l r)}. \quad (3.8)$$

где θ – полярный угол направления наблюдения;

r – радиус точки наблюдения, м;

ω – циклическая частота гармонического колебания, рад/с;

$k_l = \omega/C_l$ – волновое число;

C_l – скорость продольной волны, м/с;

C_t – скорость поперечной волны, м/с;

$\gamma = C_l/C_t$ – отношение скоростей.

Численные решения могут быть получены намного проще, чем аналитические, и эти результаты могут быть использованы для обоснования мест установки преобразователей. Для оценки расхождения в аналитическом и численном решениях их предложено сравнить. Для этого решение, полученное для полупространства (3.8) сравнивалось с численными результатами процесса распространения волны в объемном теле.

Модель 15 имела форму куба со стороной 1 м и состояла из объемных элементов типа SOLID (см. рисунок 3.16). Ее физические свойства приведены в таблице 3.2. Сила 100 кН в виде импульса приложена в центральном узле на ближней грани. Длительность импульса составляла 1 мс. Ограничения по всем направлениям перемещений и поворотов обеспечены по дальней грани, совпадающей с осями x, y. На рисунке 3.16 представлены результаты конечно-элементного расчета полей перемещений U_z в момент времени, равный 0,002 с.

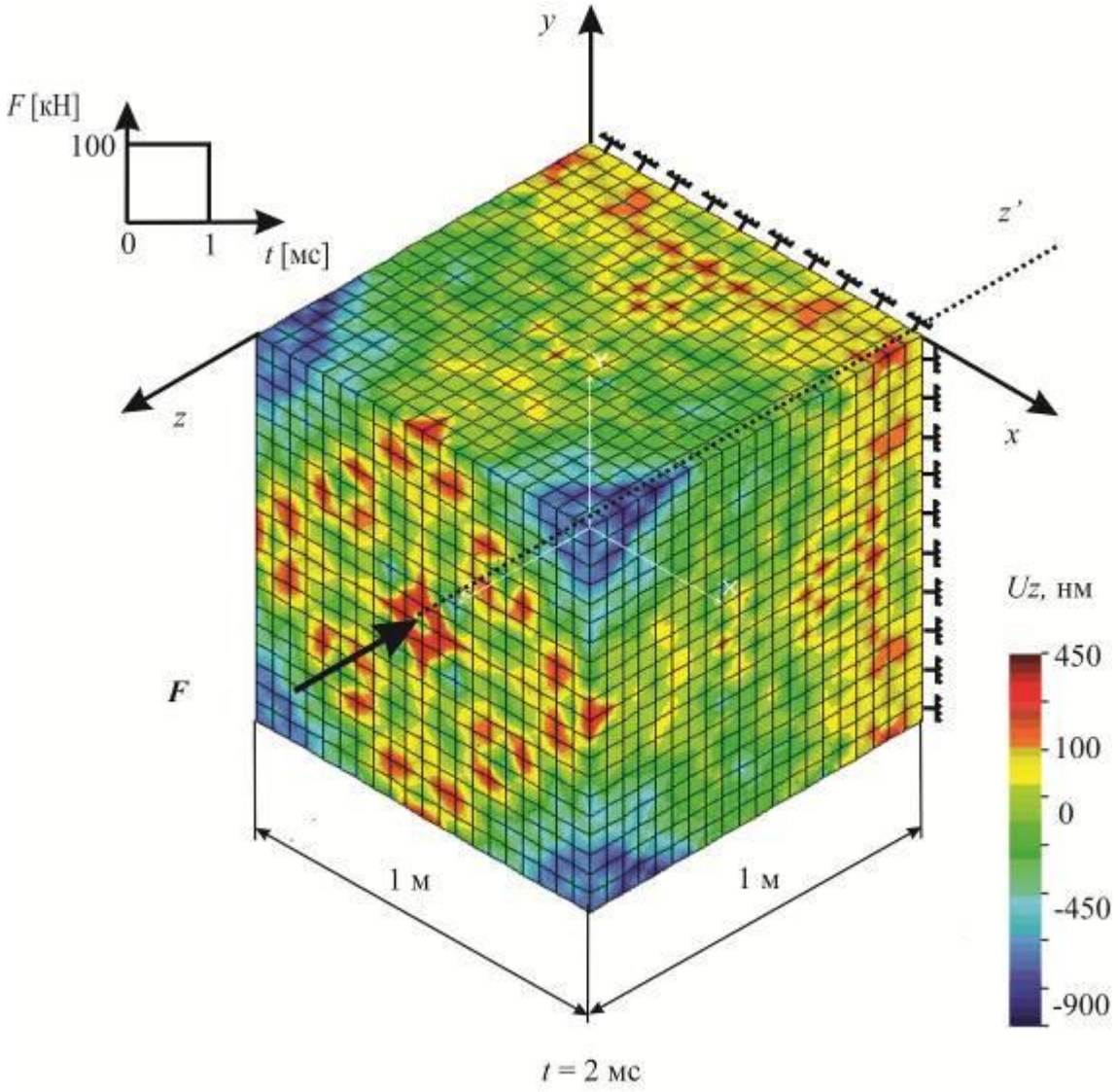


Рисунок 3.16 – Объемная Модель 15. Результаты расчета компоненты U_z в момент времени t=0,002 с

Шаг дискретизации по времени при расчете составил ~ $5 \cdot 10^{-5}$ с. При этом длина исследуемой волны составляла порядка 6 м. Размер элемента был выбран на два порядка меньше, что обеспечило требуемую пространственную дискретизацию и точность получаемых результатов.

На рисунке 3.17 представлено сравнение результатов теоретического и численного решений, которые качественно совпадают. Распределение U_z, полученное с помощью расчета по формуле 3.8, обозначено как ANALYTIC.

Теоретический расчет U_z производился для каждого узла конечно-элементной модели в направлении акустической оси z’ (при θ = 0) (3.8). Расхож-

дение результатов на постоянную величину может быть обусловлено погрешностями, связанными с дискретизацией модели либо с особенностями аналитического решения.

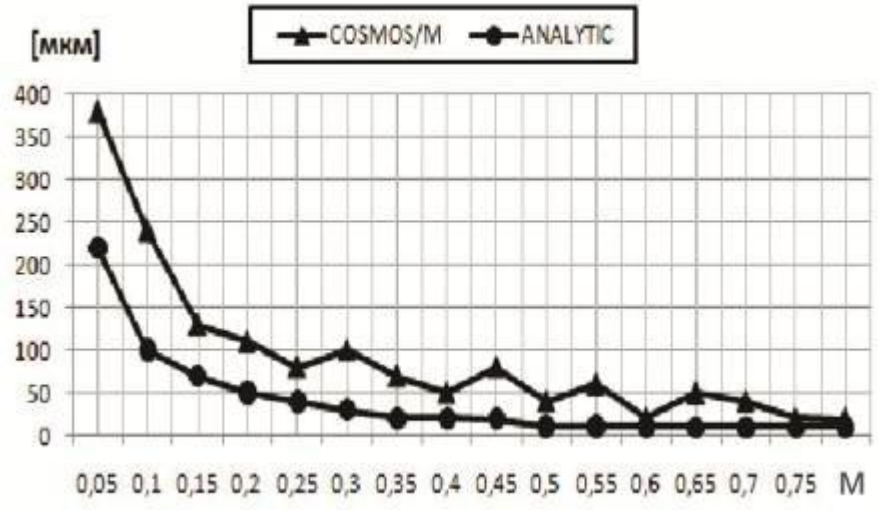


Рисунок 3.17 – Перемещения U_z вдоль акустической оси z’для Модели 18

Использование численного моделирования позволяет находить решения за короткое время. При этом могут быть сокращены трудозатраты на проведение испытаний на реальных объектах. Результаты можно использовать для обоснования мест расположения регистрирующих датчиков.

3.5 Расчетно-экспериментальное моделирование процессов распространения АЭ сигнала в плоских объектах от источника Су-Нильсена

В практике неразрушающего контроля акустико-эмиссионный метод неразрушающего контроля часто применяется для контроля объектов толщиной 6-8 мм (цистерны, сосуды и другие объекты неразрушающего контроля). Следующим этапом работ был анализ прохождения акустических волн в Моделях реальных пластин толщиной 6-8 мм и сравнение данных результатов с экспериментальными данными.

Экспериментальная схема была смонтирована на виброзащищенном столе ВИС-1 (рисунок 3.18) массой ~1000 кг.

Исследуемая пластина 2 из материала Ст3 имела размеры 0,8×0,5×0,005 м. Источником излучения акустической волны был хрупкий излом грифеля 3 твердостью 2Т диаметром 0,3 мм, выдвинутый из цангового карандаша на 3 мм (±0,5 мм). Такой излом (источник Су-Нильсена) генерирует интенсивный акустический сигнал, подобный натурному сигналу акустической эмиссии [31, 33]. К измерительной системе были подключены четыре датчика акустической эмиссии на каналы с четвертого по седьмой. После установки датчиков 4, 5, 6, 7 проведена их калибровка, обеспечивающая одинаковый уровень сигнала на каждом преобразователе.

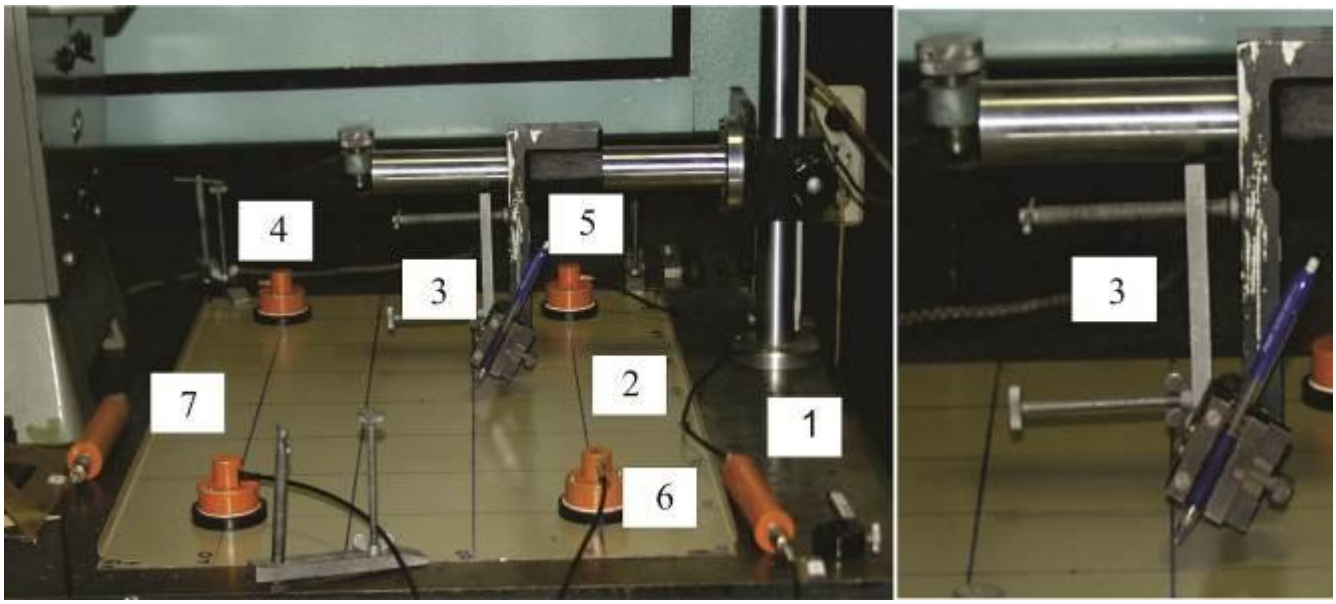


Рисунок 3.18 – Экспериментальная схема проведения акустико-эмиссионного контроля с использованием источника Су-Нильсена

1 – виброизолированная плита, 2 – исследуемая пластина, 3 - грифель, 4, 5, 6, 7 – датчики регистрации акустических сигналов

На рисунке 3.19 представлена схема обработки сигналов при АЭ-контроле. Акустико-эмиссионная волна, распространяющаяся по объекту контроля 1 (рисунок 3.19) приходит на преобразователь 2 (или датчик), который преобразует смещение поверхности в напряжение, далее сигнал по кабелю поступает в предварительный усилитель акустических сигналов 3, далее усиленный сигнал приходит в

аналогоцифровой преобразователь 4, установленный на входе системы 5, и только потом оцифрованный сигнал поступает в акустико-эмиссионную систему 5 СЦАД-16.02 для дальнейшей обработки.

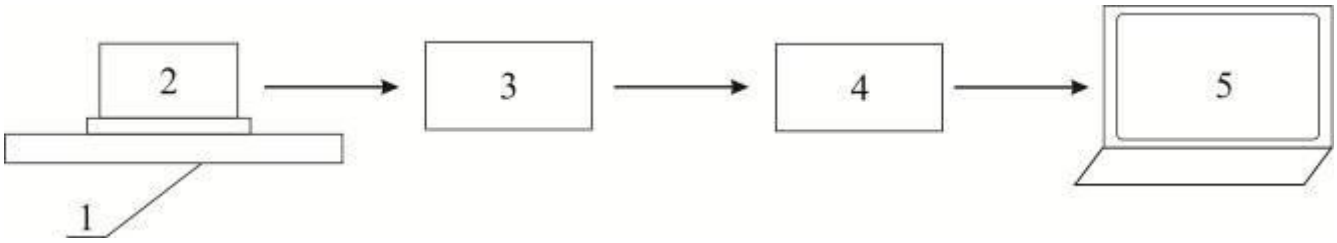


Рисунок 3.19 – Схема обработки сигналов при акустико-эмиссионном контроле

В эксперименте сигналы регистрируются системой цифровой акустико-эмиссионной диагностической СЦАД-16.02 совместной разработки ФГУП «СибНИА им. С. А. Чаплыгина» и ФГБОУ ВПО СГУПС [3]. Эта система является диагностической системой утвержденного типа и внесена в государственный реестр средств измерений (Свидетельство об утверждении типа RU.C.27.007.A №39729/1). Данная акустико-эмиссионная система имеет 16 каналов, и может проводить регистрацию акустических сигналов в диапазоне от 10 до 700 кГц. Заявленные паспортные данные акустико-эмиссионной цифровой системы СЦАД-16.02 представлены в таблице 3.5.

Таблица 3.5 – Основные параметры системы СЦАД-16.02

Характеристика	Значение
Рабочая полоса частот системы СЦАД -16.02, кГц	от 10 до 700
Нижняя частота среза, кГц	(10 ± 0,5)
Верхняя частота среза, кГц	не менее 700
Коэффициент усиления предварительного усилителя, K_y	100±5
Основная погрешность определения координат источника сигналов акустической эмиссии (АЭ), %	не более 5
Среднее квадратическое отклонение координат источника сигналов АЭ, %	не более 3

Для борьбы с шумами и помехами в измерительной системе предусмотрен частотный фильтр, а также реализован «плавающий порог» срабатывания канала.

Это значит, что система автоматически вычисляет среднее значение шумов в канале, и формирует порог с учетом этого значения [2, 3].

Для сравнения результатов, получаемых экспериментально и численно, была создана Модель 16 (см. рисунок 3.20). Данные для численного расчета будем принимать исходя из предположения, что датчики Д4-Д7 чувствительны только к перемещениям U_z точек поверхности исследуемой пластины (по нормали к поверхности). На рисунке 3.20 а показана модель пластины и положение на ней датчиков Д4, Д5, Д6, Д7.

Граничные условия модели: по нижней грани А в каждом узле введен запрет перемещений по оси *z*, в крайних четырех узлах модели введено жесткое закрепление (рисунок 3.20 а). Источником возмущения в численной модели был импульс силы, и приложена она была в узле с теми же координатами, что и источник Су-Нильсена. Величина силы равнялась 0,5 кН, длительность импульса силы составляла 10^{-5} с, что обеспечивало частоту моделируемого сигнала не менее 100 кГц. Данная частота является характерной для реального акустико-эмиссионного сигнала. Были использованы объемные восьми-узловые элементы SOLID, характерный размер элементов, составлял 4 мм, что согласуется с традиционными требованиями по пространственной дискретизации.

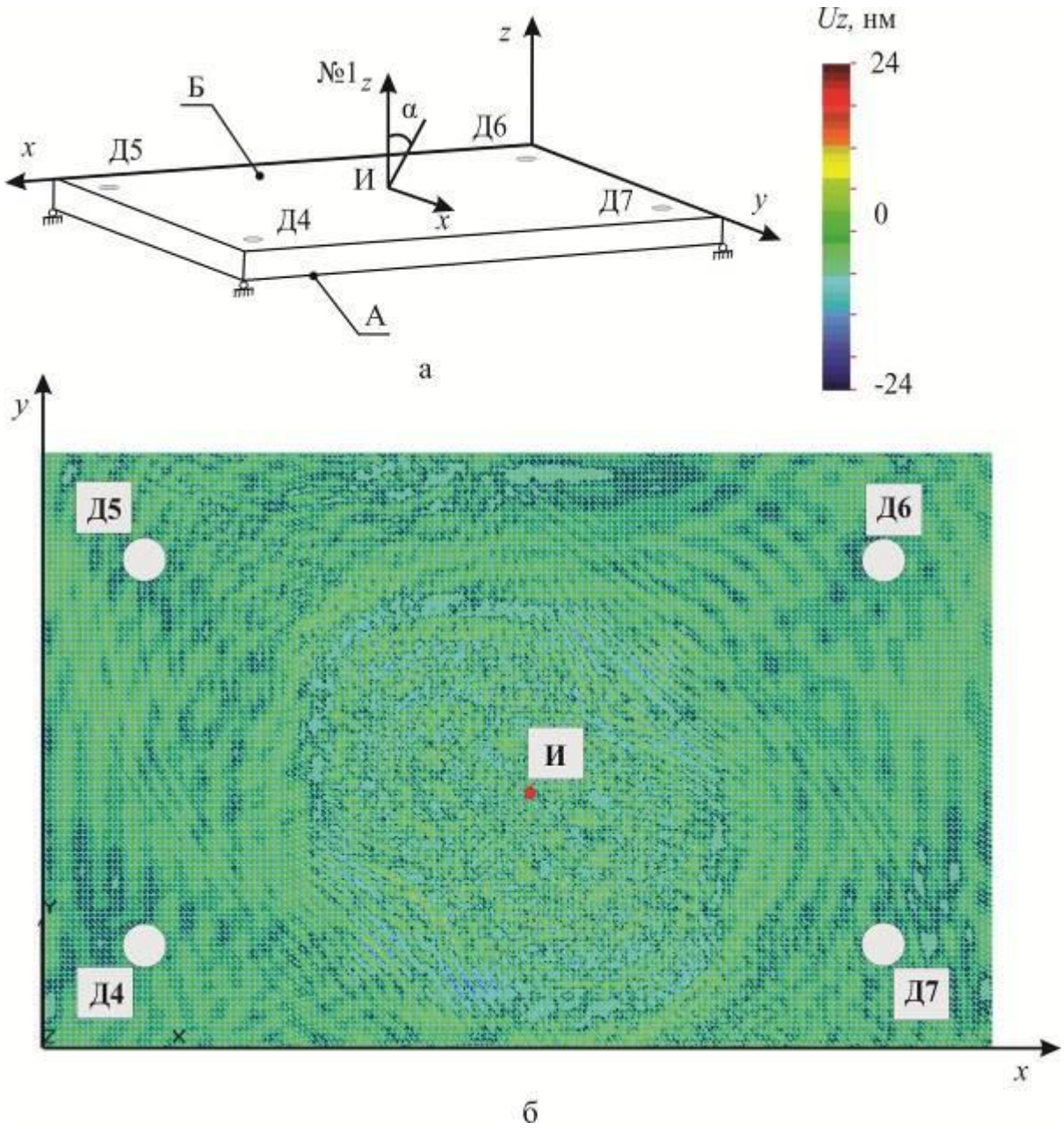


Рисунок 3.20 – Модель 16. Конечно-элементное моделирование процесса распространения
акустико-эмиссионной волны
а – конечно-элементная Модель16 пластины толщиной 5 мм
Д4, Д5, Д6, Д7 – датчики акустической эмиссии,
подключенные соответственно на 4, 5, 6, 7 каналы.
б – результаты конечно-элементного расчета процесса распространения акустико-эмиссионной волны в пластине – перемещения U_z в момент времени t =140 мкс

В численном эксперименте требование для шага дискретизации по времени [84, 85] равнялось $\Delta t = 5 \cdot 10^{-7}$ с, что обеспечило решение задачи распространения акустической волны в материале объекта с высокой точностью.

В данном эксперименте к системе СЦАД-16.02 были подключены четыре преобразователя (датчика). На рисунке 3.21 а представлена форма электрического сигнала, регистрируемого датчиком №4 системы СЦАД-16.02, на рисунке 3.21 б – тот же сигнал, но до момента времени 200 мкс, что позволяет просматривать быструю моду сигнала, по которой и проводится локализация источника. С экспериментальными результатами сравнивается полученное численное перемещение U_z в узле с координатами (рисунок 3.21 в), совпадающими с координатами датчика № 4 [3]. Сопоставление полученных результатов позволяет говорить о подобности сигналов, полученных численным методом и зарегистрированных в реальном эксперименте.

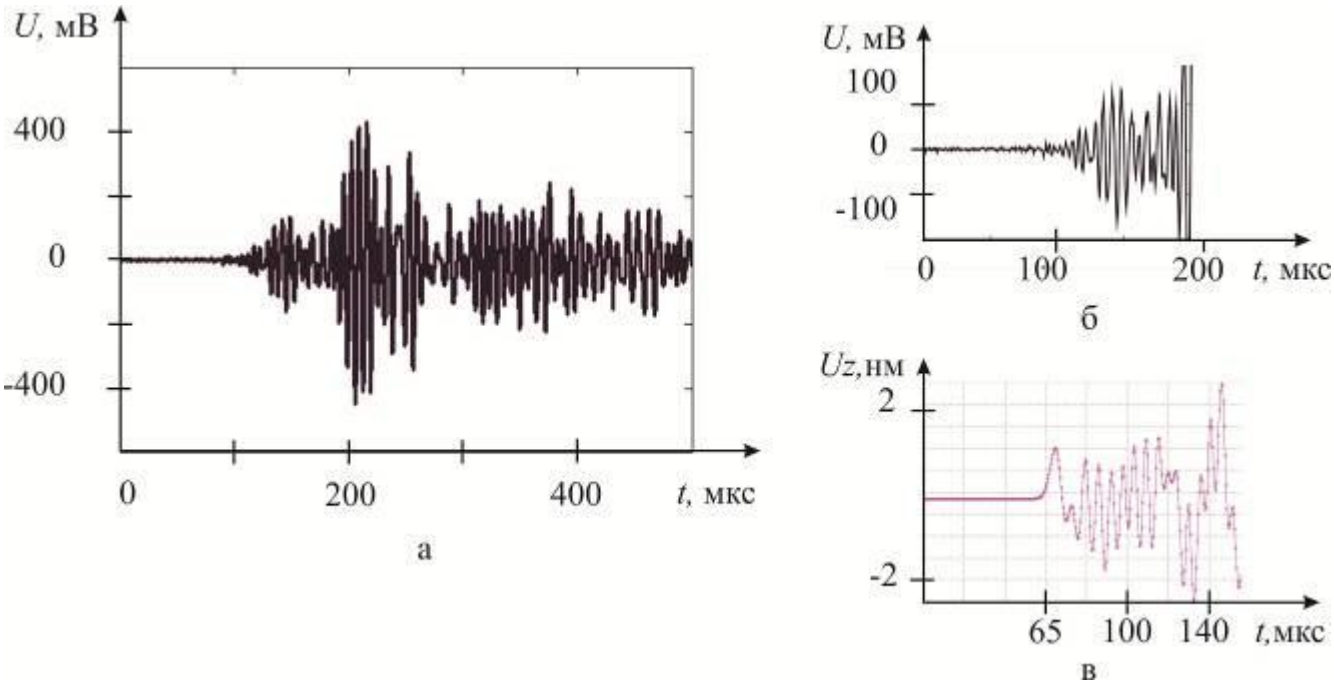


Рисунок 3.21 – Сравнение результатов физического и численного акустико-эмиссионного контроля

а – результаты отклика датчика №4 в акустико-эмиссионной системе СЦАД-16.02; б – результаты отклика датчика №4 в акустико-эмиссионной системе СЦАД-16.02 (быстрая мода); в – результаты численного расчета модели для узла с теми же координатами

Ключевым отличием численного и натурного эксперимента является то, что численное моделирование позволяет оценивать абсолютное время прихода сигнала (рисунок 3.21 в), тогда как регистрация сигналов акустико-эмиссионным методом ведется с использованием инструментов разности времен прихода акустико-эмиссионных сигналов на преобразователи. Поэтому регистрация системой ведется по факту срабатывания источника на одном из каналов (принявшим сигнал первым), дополнительно записывается предыстория. Поэтому на рисунке 3.21 б время прихода сигнала равно ~120 мкс, на рисунке 3.21 в время прихода сигнала ~ 65 мкс. В АЭ системе возможно зафиксировать только относительное время прихода сигналов на разные датчики. Зная разность времен прихода на разные преобразователи, по известной скорости акустических волн вычисляется координата источника. Этот способ локализации источника сигнала называется методом разности времен прихода, и используется в акустико-эмиссионных системах СЦАД-16.02 как основной метод локализации как при плоскостной, так и при зонной локализации.

Такой метод локализации измерений в системе СЦАД-16.02 относится к косвенным измерениям.

Погрешность косвенных измерений вычисляется по формуле:

$$df = K_{П} \cdot \sqrt{\left(\frac{\partial f}{\partial x} \cdot \Delta x\right) + \left(\frac{\partial f}{\partial y} \cdot \Delta y\right)} \qquad (3.9)$$

где $f(x,y)$ – функция, которая зависит от x и y, x и y – переменные в функциональной зависимости, $K_{П}$ – коэффициент, зависящий от количества измерений, df - погрешность в определении функции, при условии, что x и y – независимые друг от друга переменные.

Функция, используемая в системе СЦАД для определения координат источника:

$$x = \frac{x_1^{\,2} + T_0^{\,2} - T_1^{\,2} + 2T_c(T_0 - T_1)}{2x_1}; \qquad (3.10)$$

$$y = \frac{{y_2}^2 + {x_2}^2 + {T_0}^2 + 2T_c(T_0 - T_2) - {T_2}^2 - \frac{x_2}{x_1}\left({x_1}^2 + {T_0}^2 - {T_1}^2 + 2T_c(T_0 - T_1)\right)}{2y_2}; \qquad (3.11)$$

где x и y – нормированные на скорость C координаты источника, м; x_0, x_1, x_2, x_3, y_0, y_1, y_2, y_3 – нормированные на скорость C координаты точек установки датчиков, с; T_c - время, за которое сигнал проходит от источника АЭ до ближайшего датчика, с; (T_1, T_2) – разность времен прихода между датчиком, принявшим сигнал первым и соответственно первым или вторым датчиком (последующими), с [80].

При вычислении системой координаты источника точка начала отсчета переносится в координату датчика, принявшего сигнал первым, ось x проводится через датчик, принявший сигнал первым (например, Д0) и последующим датчиком (Д1). Оси масштабируются относительно скорости распространения волны (C = *const*); координатные оси поворачиваются таким образом, чтобы ось абсцисс проходила через Д0 и Д1. Определение координат сигнала акустической эмиссии производится после решения следующей системы уравнений 3.10 и 3.11.

Следующий эксперимент проводился с пластиной размерами 1,0×1,0×0,008 м. Оборудование для эксперимента было расположено на виброизолированном столе ВИС-1, как показано на рисунке 3.22. Объектом контроля служила пластина 1 из стали 20. Хрупкий излом грифеля 2 в установке для излома генерировал АЭ сигнал. Грифель диаметром 0,5 мм имел твердость 2Т, был выдвинут из цангового карандаша на 3 мм (±0,5 мм). Датчики Д0, Д1, Д2, Д3 на рисунке 3.22, регистрируют только смещения U_z точек поверхности пластины (по нормали).

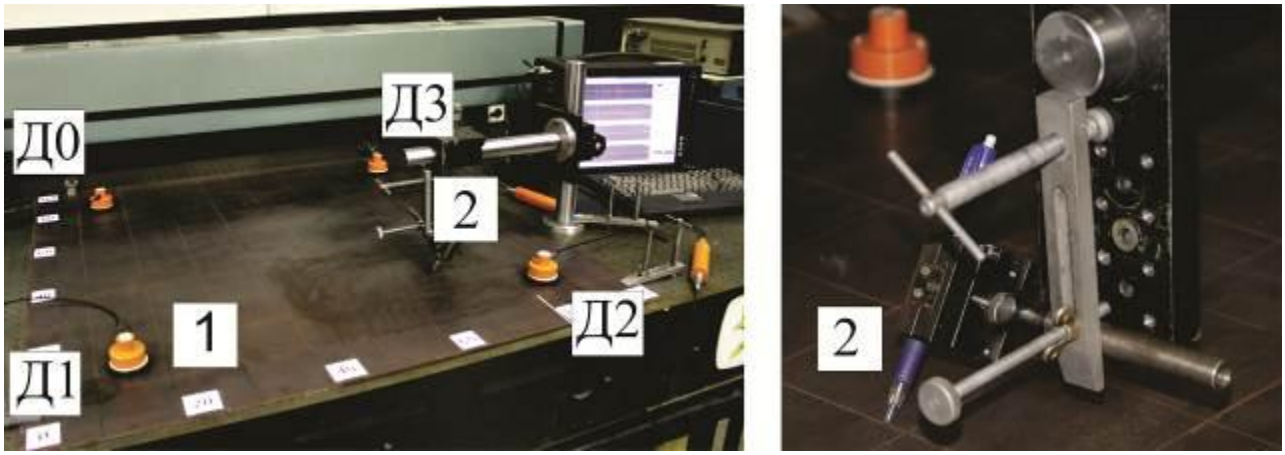


Рисунок 3.22 – Физический эксперимент с пластиной толщиной 8 мм.

Для сопоставления результатов физического и численного эксперимента была создана конечно-элементная модель пластины с размерами 1 м × 1 м и толщиной 8 мм (рисунок 3.23 а).

Для численной модели установлен запрет перемещений U_z по нижней грани А. Модель 17 имеет характеристики стали. Количество слоев по толщине – два. Д0, Д1, Д2, Д3 –узлы с аналогичными координатами, что и места установки датчиков акустической эмиссии. Расстояние от источника И до датчика Д0 составляет 781 мм, до датчика Д1 – 510 мм, Д2 и Д3 – 223,6 и 632,5 мм соответственно.

При расчете модели реализовано требование для шага дискретизации по времени: $\Delta t \leq 5 \cdot 10^{-7}$ с, осуществлено требование для размера элементов модели: $l_e = \lambda_{min}/20 \ \ldots \ \lambda_{min}/10$, где λ_{min} – наименьшая длина волны. Импульс, имитирующий короткий сигнал акустической эмиссии, составил 10^{-5} с. Максимальная частота излучаемого сигнала равна 100 кГц. Величина прикладываемой силы равна 1 кН, сила приложена по нормали к поверхности по оси z в точке И (см. рисунок 3.23).

Картина изолиний перемещений U_z поверхности объекта контроля в момент времени, равный 180 мкс, показана на рисунке 3.23 б. Расчетное время прихода сигнала на самый отдаленный датчик составляет 150 мкс. Использована теоретическая скорость распространения акустической волны, равная 5,2 мм/мкс. Изображенная на рисунке 3.23 б неосесимметричная картина U_z является результатом сложения волн, отраженных от боковой правой и нижней граней.

На следующих графиках рисунка 3.24 а представлены зависимости от времени перемещения U_z для каждого из узлов численной модели, в которых в физическом эксперименте установлены датчики акустической эмиссии. Из рисунка 3.24 а следует, что 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. Таким образом, численная модель корректно отображает процесс распространения волны, и абсолютное время прихода волны в узел соответствует аналитическому решению.

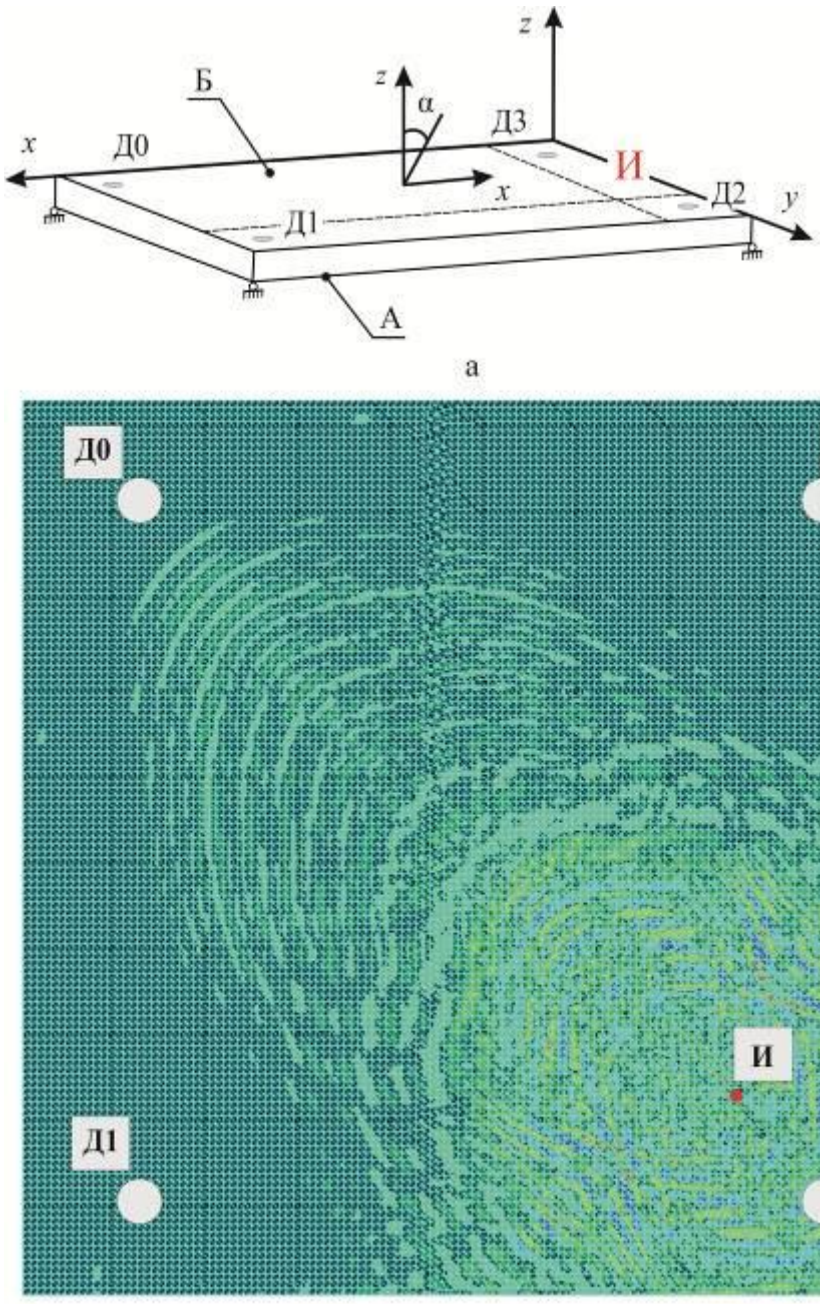


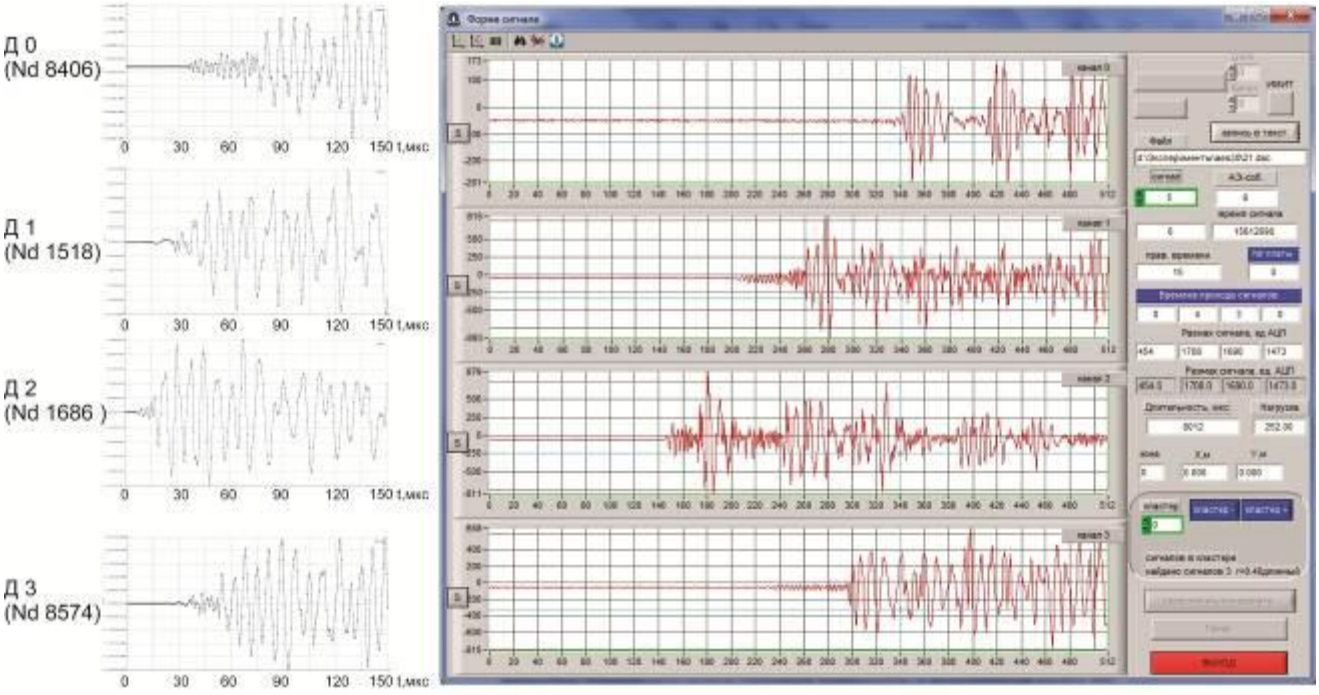
Рисунок 3.23 – Модель 17. Д0, Д1, Д2, Д3 – места установки датчиков акустической эмиссии,

И – излучатель акустической волны в объекте,

б – поля перемещений U_z поверхности модели 17

На рисунке 3.24 б показаны сигналы, зарегистрированные системой СЦАД-16.02 в ходе проведения эксперимента. Акустическая волна на ближайший датчик Д2 (канал 2 на рисунке 3.24 б) приходит первой, и с некоторым запаздываем – на

более удаленные датчики, так же, как и в численной модели. Разницу абсолютного времени регистрации волны на соседних датчиках регистрирует система.



а б

Рисунок 3.24 – Акустико-эмиссионные сигналы, полученные при физическом и при численном экспериментах

а – численные результаты перемещения узлов с теми же координатами, что и места установки датчиков;

б – сигналы, зарегистрированные системой СЦАД-16.02

С помощью численных методов может быть найдено точное абсолютное время прихода сигнала на акустический канал.

В акустическом контроле волна большой интенсивности и высокой частоты (от 1,25 МГц) может вводиться в объект контроля под разными углами (50, 60, 70 град.), обеспечивая, таким образом, направленность ультразвукового пучка. В случае акустической эмиссии при излучении акустического сигнала трещиной, направленность акустического сигнала имеет следующие особенности. Продольная волна излучается из вершины трещины в перпендикулярном направлении по отношению к берегам трещины. Поперечные волны излучаются под углом 45° по отношению к оси трещины. При калибровке преобразователей и постановке экспериментов в лабораторных условиях, использовать образцы с натурными трещи-

нами не представляется возможным, поэтому чаще всего используют источник Су-Нильсена. Нормативными документами, которые регламентируют проведение акустико-эмиссионного контроля, направленность грифеля в плоскости объекта контроля при изломе (источник Су-Нильсена) не оговорена [33]. По [33] регламентируется только угол наклона не более 30° к нормали к поверхности. Предполагается, что положение грифеля по отношению к нормали к поверхности влияет на параметры регистрируемых сигналов. Работы, касающиеся направленности излучения при акустико-эмиссионном контроле, рассмотрены в Разделе 1 настоящей работы.

Рассмотрим оценку влияния направления излома грифеля при проведении пробы Су-Нильсена на примере физического эксперимента. Регистрирующей аппаратурой в данном эксперименте также выступала система цифровая диагностическая СЦАД-16.02. Анализировались параметры принимаемых сигналов. Для эксперимента использовалась пластина толщиной 8 мм, показанная на рисунке 3.22. При этом к системе подключены четыре преобразователя акустической эмиссии по такой же схеме, что и в предыдущем эксперименте. При проведении эксперимента были уточнены координаты преобразователей на объекте контроля и занесены в компьютер. Измерения произведены с точностью 0,1 мм. Эти координаты представлены в таблице 3.6.

Таблица 3.6 – Координаты преобразователей на объекте контроля

Номер преобразователя	Координата *x*, м	Координата *y*, м
Д0	0,1490	0,8470
Д1	0,1454	0,1518
Д2	0,8508	0,1467
Д3	0,8525	0,8444
И	0,4950	0,5100

Проведено четыре опыта при различной ориентации грифеля, что показано на рисунке 3.25 а. Схема проведения экспериментов представлена на рисунке 3.25. Источник И располагался в центре пластины. При каждой серии экспериментов АЭ система определяла координаты источника сигнала.

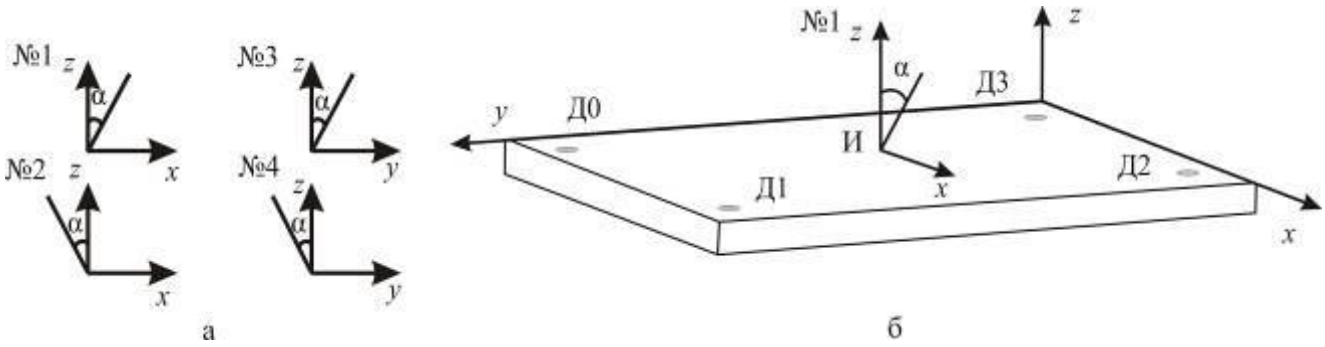


Рисунок 3.25 – Схема эксперимента и модель при разной ориентации грифеля. а – варианты ориентации грифеля при проведении эксперимента, б – Модель, используемая для численного и натурного эксперимента

Координаты источника И были равны (0,495; 0,510 м). На все четыре датчика сигнал приходит практически одновременно, с разницей в несколько микросекунд. Характерная форма сигнала на четырех датчиках для экспериментов представлена на рисунке 3.25:

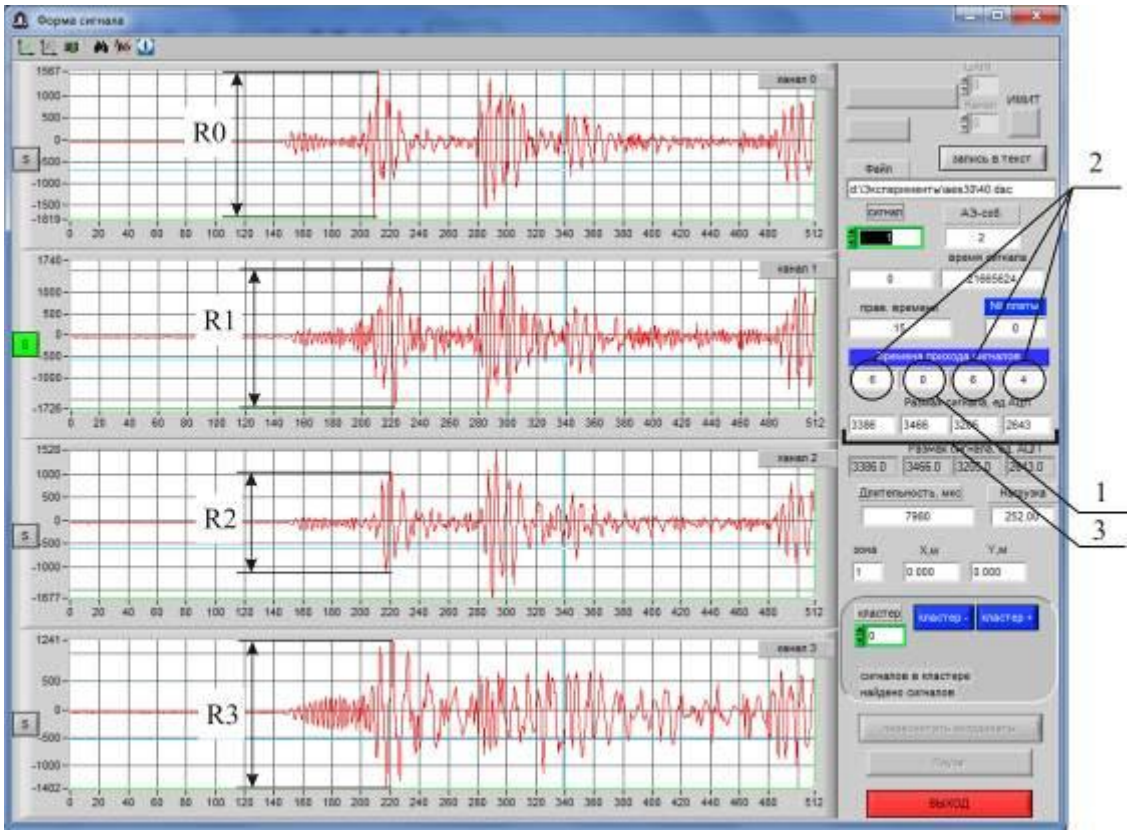


Рисунок 3.26 – Зарегистрированные АЭ сигналы при изломе грифеля в центре пластины. 1 – для преобразователя, принявшего сигнал первым, РВП равно нулю, 2 – РВП между ближайшим преобразователем и остальными преобразователями, 3 – Размах сигнала на каждом преобразователе R_1, R_2, R_3, R_4

В ходе проведения эксперимента с разной ориентацией грифеля, выявлено, что форма сигналов на датчиках повторяема. При проведении серии изломов в центре пластины, «портрет» датчиков не изменялся. Средние значения координат источника, которые определила система по результатам серии 10 опытов: x = 486, 8 мм; y = 510, 46 мм. Среднеквадратическое отклонение (СКО) для координат S_y = 0, S_x = 3,87 мм.

Вторая часть эксперимента предполагала излом грифеля в другой точке (0,65; 0,25 м). Для этой ассиметричной точки также было проведено четыре серии опытов с разной ориентацией грифеля. В таблице 3.7 приведены средние значения координат, вычисленные АЭ системой для всех четырех опытов. Номер опыта в таблице 3.7 соответствует номеру схемы на рисунке 3.25 а.

Таблица 3.7 – Экспериментальные результаты при разной ориентации грифеля для источника с координатами (0,65; 0,25 м)

№ опыта	($x \pm \Delta$) мм	($y \pm \Delta$) мм	СКО, S_x, мм	СКО, S_y, мм
1	640,6	254,5	2,1	9,2
2	641,6	264,0	0,0	0,0
3	641,7	264,9	0,0	2,1
4	639,8	267,8	2,6	2,1

Погрешность в определении координаты вычисляется в соответствии с (3.6).

Анализ результатов натурного эксперимента показал, что направленность грифеля влияния на картину зарегистрированных сигналов системой СЦАД-16.02 не оказывает.

В результате проведения серии экспериментов установлено, что регистрируемые сигналы и результаты, полученные в численной модели, являются сопоставимыми. Сравнить абсолютное время прихода сигнала невозможно ввиду применения специфического алгоритма в регистрирующей аппаратуре, однако форма сигнала в численной модели и реальной подобна. Полученные результаты свидетельствуют о корректности используемых алгоритмов при численном моделировании процесса распространения акустических волн.

3.6 Выводы по разделу 3

Предложенные методы моделирования процесса распространения акустико-эмиссионной волны в объектах позволили получить результаты распространения акустико-эмиссионных волн в реальных объектах контроля.

В результате серии численных экспериментов с тестовыми линейными моделями отработан алгоритм, изучено влияние густоты сетки и временного шага на результаты моделирования.

Тестовые модели плоских объектов позволили отработать алгоритм распространения волн в различных объектах с различной геометрией. Анализируются модели с разной пространственной дискретизацией, с границей раздела двух сред, с различными концентраторами. Рассматривались концентраторы в виде несплошности, полости, трещины с разной величиной раскрытия.

Тестовые модели плоских объектов позволили перейти к объемным моделям. Для плоских моделей получена хорошая сходимость для скорости распространения акустических волн – сравнивалась теоретическая скорость распространения волн и численные результаты.

Получены сравнительные результаты для процесса распространения акустических волн в объемном теле. Сравнивались результаты конечно-элементного расчета с помощью разработанного конечно-элементного расчета и аналитические результаты по известным решениям.

Рассмотрены и обсуждаются результаты сравнения численных результатов распространения акустических волн в реальных пластинах толщиной 6-8 мм. Получены результаты акустико-эмиссионных испытаний реальных пластин и их сравнение с результатами численного расчета, и для них получена хорошая сходимость результатов.

4 ПОВЫШЕНИЕ ИНФОРМАЦИОННОЙ НАДЕЖНОСТИ АКУСТИКО-ЭМИССИОННОГО НЕРАЗРУШАЮЩЕГО КОНТРОЛЯ ОБЪЕКТОВ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОГО ТРАНСПОРТА

4.1 Анализ существующей технологии неразрушающего контроля литых деталей тележки грузового вагона

Как уже обозначалось выше, акустико-эмиссионный метод нашел свое применение для объектов железнодорожного транспорта. В больших объемах акустико-эмиссионным методом контролируются литые детали тележек грузовых вагонов: боковые рамы и надрессорные балки. Эти детали являются ответственными несущими деталями тележки, в то же время боковая рама и надрессорная балка очень массивные и имеют достаточно грубую поверхность.

Общий вид тележки грузового вагона представлен на рисунке 4.1.

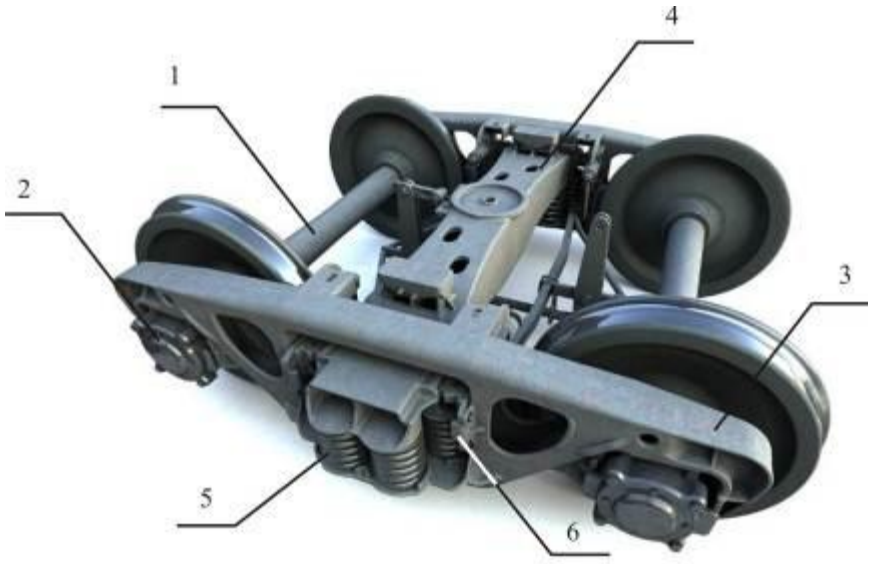


Рисунок 4.1 – Общий вид тележки грузового вагона модели 18-100

1 – колесные пары, 2 – буксы колесных пар, 3 – боковая рама тележки

4 – надрессорная балка тележки, 5 – рессорное подвешивание,

6 – фрикционные планки

Шероховатость поверхности данных деталей в процессе эксплуатации может доходить до R_z80, что связано с технологией изготовления (литые детали)

и особенностями эксплуатации. Из всех видов, и, соответственно, методов неразрушающего контроля акустико-эмиссионный метод акустического вида неразрушающего контроля единственный обладает такими преимуществами, как интегральность и пассивность. Данные свойства обеспечивают, во-первых, 100% контроль всей массивной детали за короткий промежуток времени, во-вторых, отсутствие необходимости генерировать сканирующий луч (УЗ пучок) как, например, в ультразвуковых методах. Второе свойство приводит к отсутствию необходимости обосновывать интенсивность, направление, угол ввода сканирующего излучения, проводить очистку детали по траектории сканирования, что для таких массивных и сложных с геометрической точки зрения деталей представляло бы серьезные трудности. К примеру, УЗК не используется для контроля литых деталей. Вихретоковые методы (ВТК) используются для контроля только определенных участков этих деталей. Выбор таких участков представляет собой сложную научно-практическую задачу. В данный момент существуют большие неоднозначности в определении зон сканирования при ВТК литых деталей тележки грузового вагона, связанные с переходом на новые документы Правила неразрушающего контроля вагонов, их составных частей и деталей при ремонте.

Если рассматривать класс магнитных методов, то, к сожалению, в силу массивности и больших габаритов во всех направлениях литых деталей тележки, проводить магнитный контроль практически удается только накладными преобразователями. В перспективе, возможно, будут разработаны соленоиды и иные приспособления для интегрального намагничивания боковых рам и надрессорных балок, хотя данные приспособления должны быть больших размеров (детали должны размещаться в них). Ранее на сети железных дорог существовали феррозондовые установки, применяемые для интегрального контроля боковых рам и надрессорных балок. Кроме того, недостатками магнитных методов является возможность выявлять только поверхностные и подповерхностные дефекты.

Все эти аспекты делают акустико-эмиссионный метод контроля литых деталей тележки и иных массивных и сложных объектов перспективным еще надолго. Конечно, есть и недостатки данного метода. Во-первых, достаточно высокая стоимость акустико-эмиссионной аппаратуры, недолговечность преобразователей АЭ, относительная сложность технологии контроля, а также ее, по сути, уникальность при применении различных акустико-эмиссионных систем. С еще большими трудностями сталкиваются разработчики акустико-эмиссионной аппаратуры. Они закладывают определенные алгоритмы работы и математический аппарат в разрабатываемую акустико-эмиссионную систему, которые в последующем практически невозможно изменить без вмешательства непосредственно в аппаратуру. Примером может служить зонная локация, реализованная в системе разработки ФГУП СибНИА им. Чаплыгина и Сибирского государственного университета путей сообщения для литых деталей тележки грузового вагона. Суть метода заключается в следующем. Деталь, сложную с геометрической точки зрения, разбивают на некоторые зоны. В каждой плоской зоне акустико-эмиссионную антенну образуют минимум три преобразователя, которые локализуют источник АЭ при его срабатывании в этой зоне. Для возможности локализации в системе прописан подробный алгоритм, математический аппарат, исходящий из координат установленных ПАЭ. Для точной локализации (в пределах заявленной погрешности) необходимо, чтобы преобразователи были установлены на местах в соответствии с технологическими картами и схемами, для каждого такого объекта индивидуально. Однако существует также проблема обоснования мест установки преобразователей на объемном объекте сложной формы. Аналитически решить данную проблему сложно, возможно получить решение только для самой простой геометрии тел.

На рисунке 4.2 представлена схема расстановки ПАЭ при акустико-эмиссионном контроле боковой рамы таврового сечения (модели 18-100).

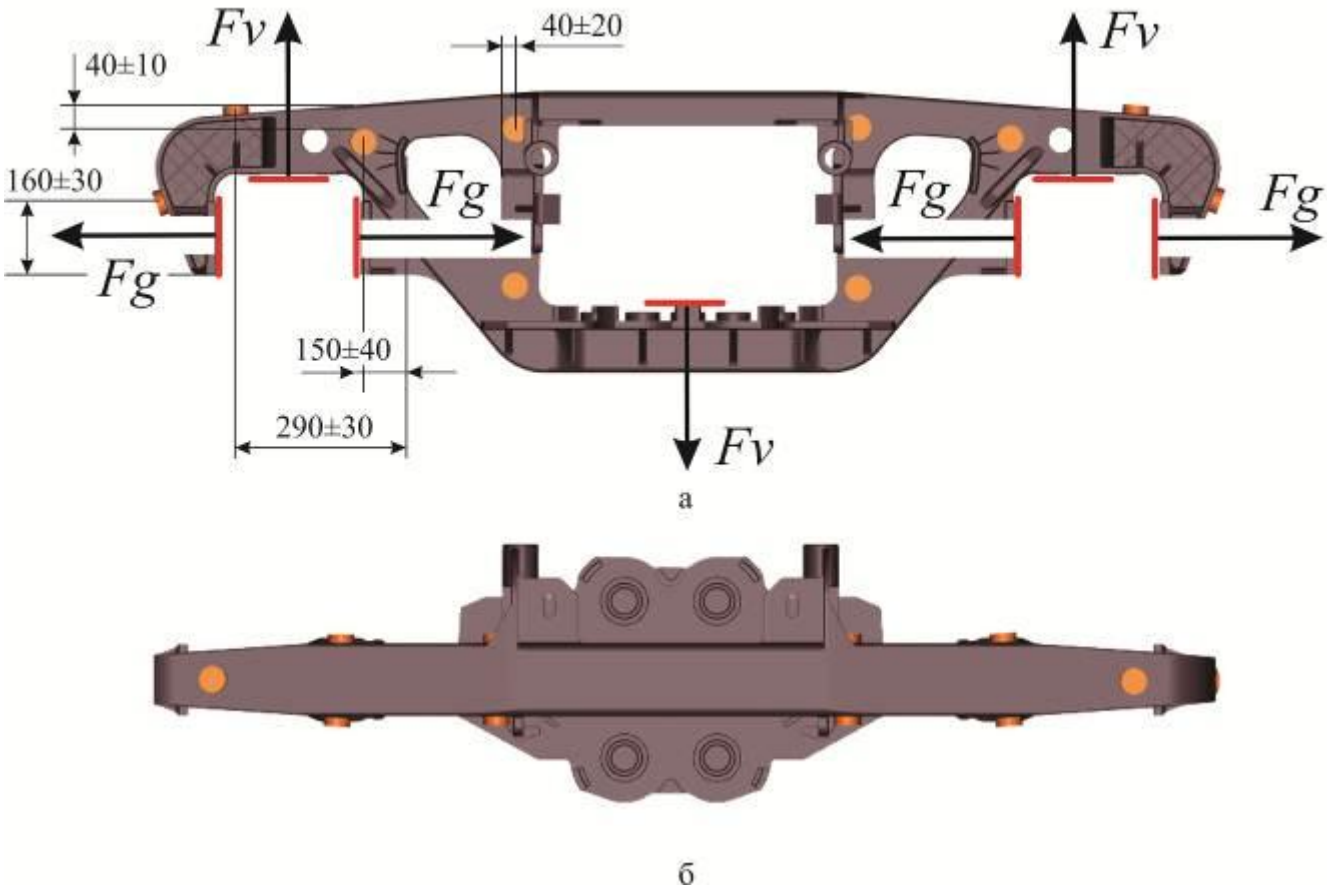


Рисунок 4.2 – Конструктивная схема для боковой рамы тележки грузового вагона
а – схема расстановки датчиков АЭ при контроле согласно технологической инструкции при АЭ контроле, фронтальная плоскость;
б – вид сверху

4.2 Моделирование процесса распространения волны в боковой раме тележки грузового вагона

Конечно-элементная модель боковой рамы тележки модели 18-100 была создана в программном комплексе SolidWorks. Некоторое количество элементов рамы, не являющихся значительными для анализа процесса распространения волны в боковой раме тележки грузового вагона, были исключены из модели. Основные же конструктивные элементы, ребра жесткости, характер поперечных

сечений в раме, были сохранены (см. рисунок 4.3). В точности воссоздана внутренняя структура боковой рамы тележки, перемена сечений - тавровое в концевых частях, полое – в средней части детали.

Акустико-эмиссионный сигнал имитирован силой в виде импульса амплитудой 1 кН. Длительность импульса составляла 10^{-5} с. Сила прикладывалась в буксовом проеме, что показано на рисунке 4.3 стрелкой 3 (см. рисунок 4.3). Место приложения силы было выбрано таким потому, что именно в буксовых проемах наиболее часто зарождаются трещины.

Частота быстрой моды акустической волны, генерируемой таким импульсом, составляет 100 кГц. Для данной величины частоты АЭ-сигнала длина волны распространяющихся колебаний составляет более 6 см.

Конечно-элементная сетка была сгенерирована таким образом, что в областях переходной геометрии (отверстия, скругления отливки, и т.п.) размер конечного элемента составлял меньше 5 мм, то есть густота сетки была более 12 конечных элементов на один характерный размер волны, что показано на рисунке 4.3. В остальном теле боковой рамы размер конечного элемента составил от 5 до 7 мм, что согласуется с требованиями по пространственной дискретизации [86, 88].

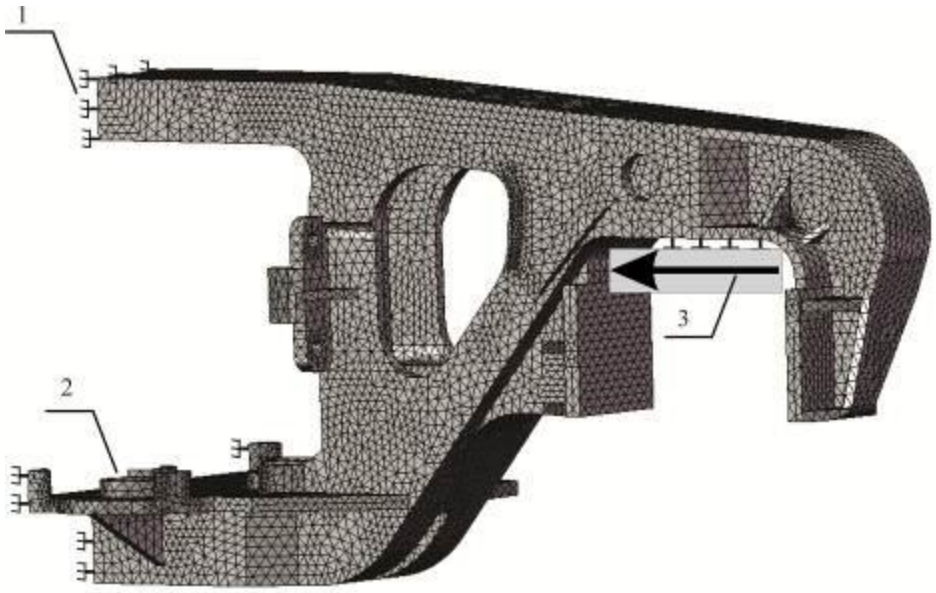


Рисунок 4.3 – Конечно-элементная сетка модели боковой рамы

Граничные условия были определены следующим образом: так как объект имеет плоскость симметрии, по правым граням были заданы граничные условия

«симметрия» 1. Также модель была несколько упрощена: модель имеет опорные площадки под рессорное подвешивание 2, что видно на рисунке 4.3, они создают асимметрию относительно фронтальной плоскости. Однако в этих площадках боковой рамы трещин не возникает, преобразователи там также не устанавливаются, поэтому для расчета взята только четверть модели. Стрелкой 3 показано направление приложения силы.

Исследования, которые касаются анализа распределения напряжений в боковой раме и надрессорной балке при реальных режимах эксплуатации, хорошо известны [76, 95]. На рисунке 4.4 представлены результаты обобщенного анализа наиболее вероятных мест возникновения трещин.

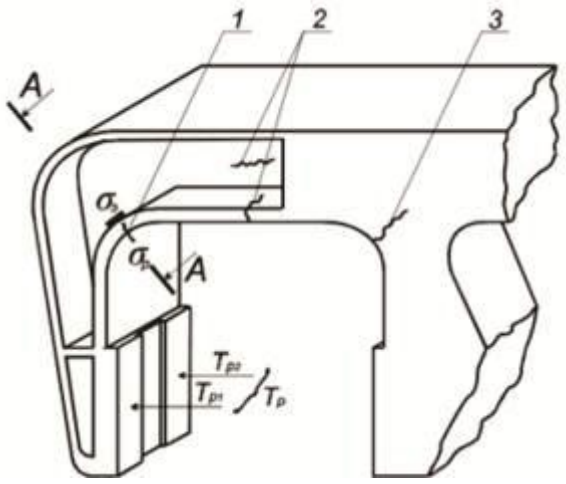


Рисунок 4.4 – Схема передачи продольной силы н наружную «челюсть» боковой рамы,

1 – 3 – наиболее распространенные места возникновения трещин в боковой раме тележки грузового вагона

В реальной конструкции (см. рисунок 4.1) боковая рама 3 опирается поверхностями буксовых проемов на буксы колесных пар тележки 2, через фрикционные планки 6 взаимодействует с остальными деталями, также на нее действует вес надрессорной балки 4, которая лежит на упругих элементах (рессорах) 5.

Акустико-эмиссионный контроль боковой рамы проводят при плановых видах ремонта после разбора тележки грузового вагона. Деталь с помощью кран-

балки устанавливают на специальный стенд (нагружающее устройство) и подвергают контролю.

Исходя из условий АЭ контроля, были выбраны закрепления типа «ролик», который предполагает запрет перемещений для грани по ее нормали. Данные закрепления были применены для модели в буксовых проемах.

Так как длительность импульса составила $1 \cdot 10^{-5}$ с, то максимальный шаг дискретизации был выбран равномерным и равным 10^{-6} с, что обеспечивает 10 точек на один импульс. Из-за ограниченности вычислительных ресурсов, этот шаг является наиболее приемлемым. Для модели была создана конечно-элементная сетка из объемных элементов (SOLID), сетка создавалась с помощью встроенных функций программы – не «стандартная» с автоматическим переходом по кривым, максимальный размер элемента 10 мм, минимальный 6 мм, коэффициент 1,8, точек Якобиана – четыре. Данный расчет имел значительные трудности в связи с габаритами модели и вычислительными объемами и был проведен до момента времени, равного 100 мс. При этом акустическая волна претерпела отражение от свободного края и прошла полный путь, равный 5,2 м. Модель состояла из 133 541 узлов, 73687 элементов. При этом процентное количество элементов с соотношением наибольшей и наименьшей сторон меньше 3 составило 96,7%, с соотношением сторон >10 составило 0,21%, что говорит о качественно построенной сетке.

Теоретическая скорость распространения волны составляла 5,2 мм/мкс. На рисунке 4.5 показаны результирующие перемещения узлов модели U_{res} и поля перемещений в моменты времени от 0 до 1000 мкс, соответственно через равные шаги 50 мкс (от 30 мкс до 1000 мкс). Шаг – 50 мкс, за которые волна по теоретической оценке проходит от 26 до 30 мм.

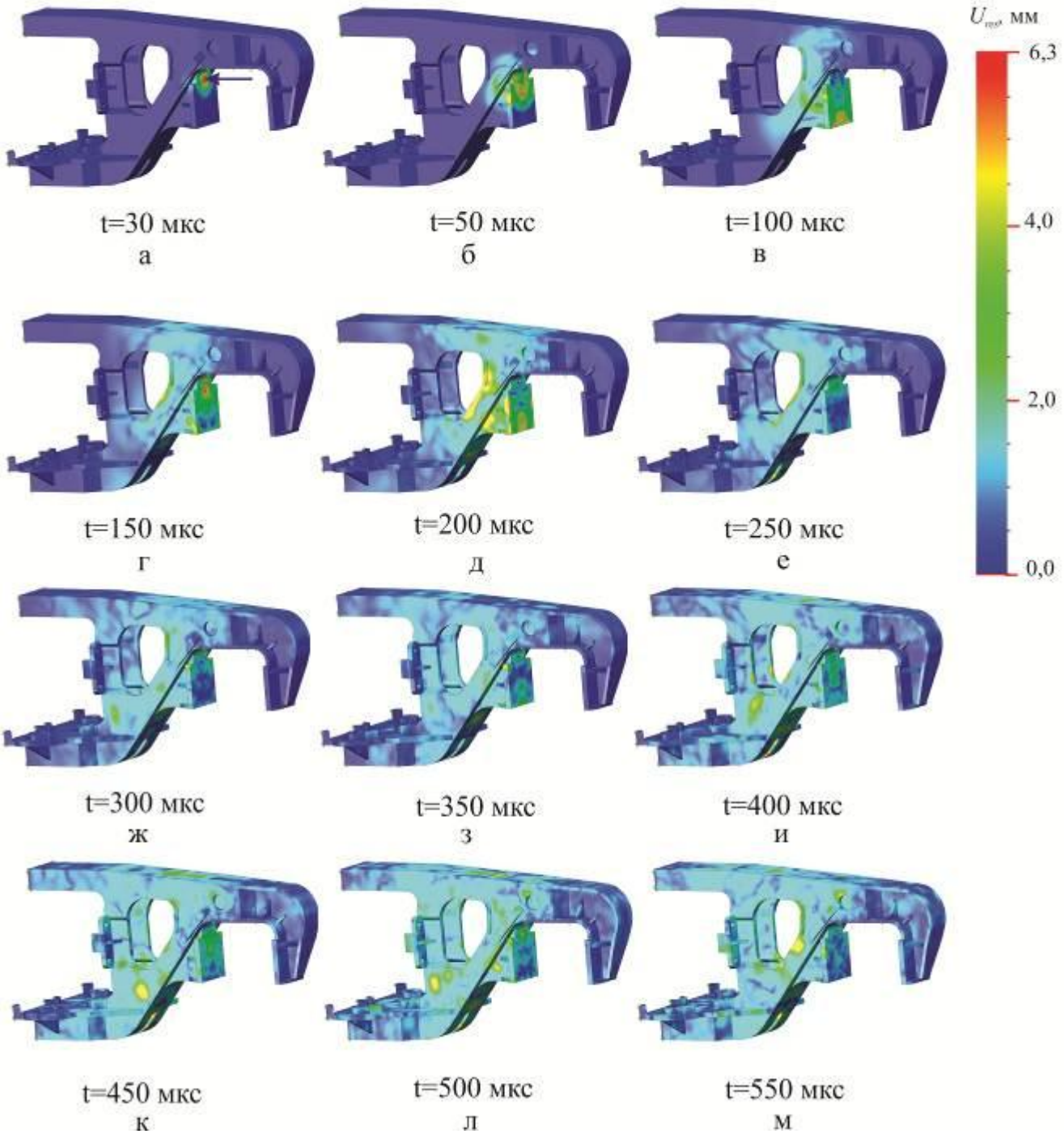


Рисунок 4.5 – Процесс распространения волны в боковой раме тележки грузового вагона (поля результирующих перемещений U_{res})

Из рисунка 4.5 видно, что фронт распространения волны на начальном этапе сферичен, и скорость его распространения совпадает с теоретической. Волна начинает распространяться от источника в буксовом проеме и имеет четкую направленность (см. рисунок 4.5 а, б, в, г).

Так как результирующие перемещения U_{res} являются суперпозицией всех мод акустической волны, а преобразователь акустической эмиссии оказывается наиболее чувствительным к нормальным перемещениям поверхности, на которую он установлен, то для каждого преобразователя следует анализировать определённые компоненты акустической волны, которая распространяется по объекту.

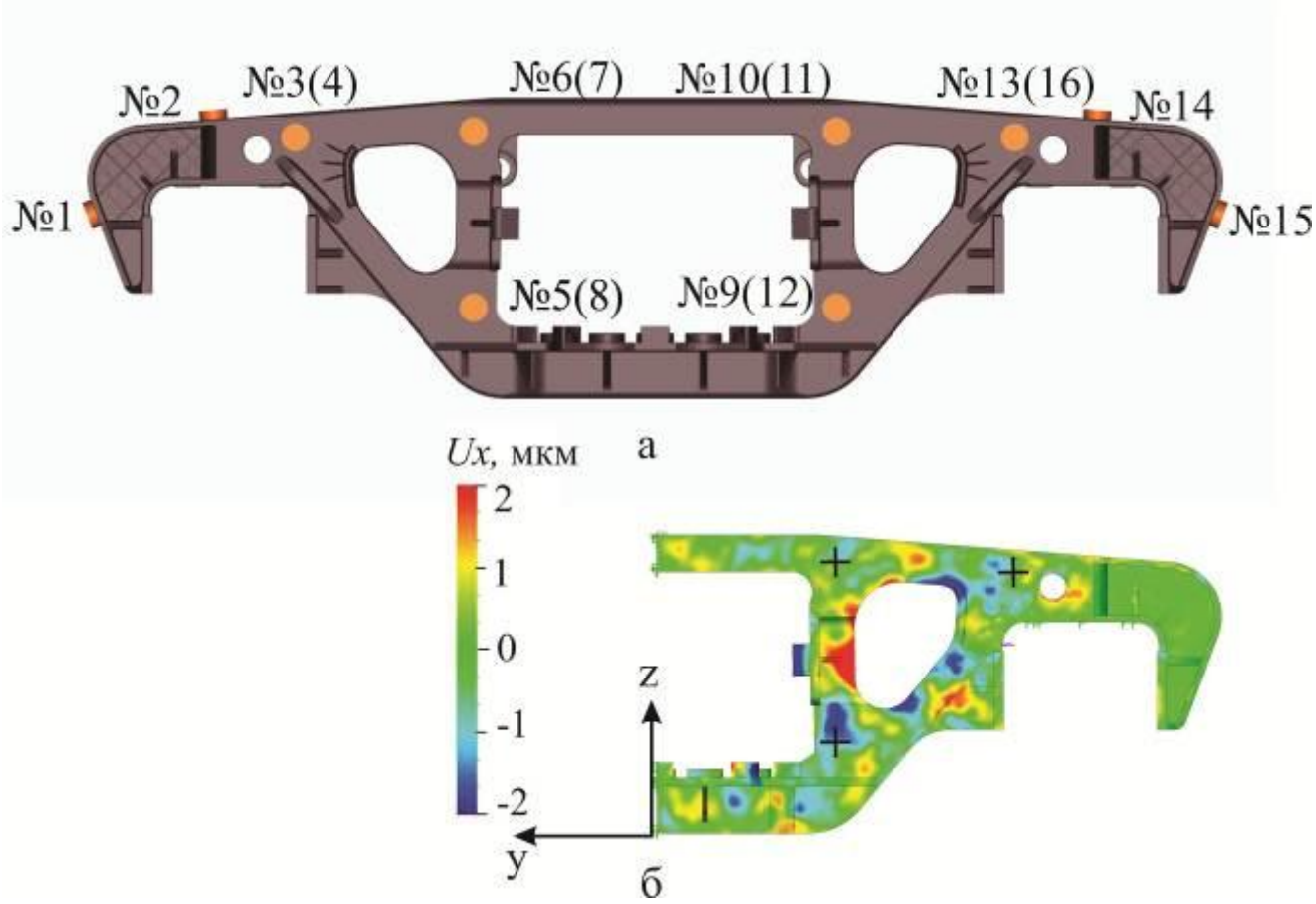


Рисунок 4.6 – Численные результаты, полученные в программной среде SolidWorks. а - схема расстановки преобразователей с номерами б – распределение нормальной компоненты перемещений U_x во фронтальной плоскости в момент времени 0,001 с

Для анализа результатов моделирования процесса распространения акустической волны в боковой раме рассмотрим рисунок 4.6. На рисунке 4.6 а представлена схема расстановки преобразователей по нормативным требованиям в фронтальной плоскости *yz* и распределение перемещений U_x в боковой раме в

момент времени t=0,001 с (рисунок 4.6 б). Как было описано выше, в данный момент времени волна многократно отразилась от краев детали и процесс можно считать устоявшимся.

На рисунке 4.6 б знаком «+» обозначены места, на которые должны быть установлены преобразователи акустической эмиссии в соответствии с действующими технологическими картами. На рисунке приведена шкала величины абсолютных перемещений U_x. Из рисунка видно, что ПАЭ номер 9 и 12, номер 10 и 11, номер 13 и 16, установлены на боковую раму в зонах, где среднее распределение перемещений по нормали U_x, к которым и являются наиболее чувствительными преобразователи, стремится к нулю (зеленый цвет).

На рисунке 4.7 в большем масштабе показаны три зоны, взятые для анализа. Зона номер 1 – зона установки преобразователей номер 9 и 12, где узел номер 7163 имеет координату установки преобразователя (по действующим нормативам). Также в зоне номер 1 показаны узлы с номерами, в которых наблюдается максимальная амплитуда приходящего сигнала от излома в буксовом проеме. Аналогичный анализ представлен для зоны номер 2 и для зоны номер 3.

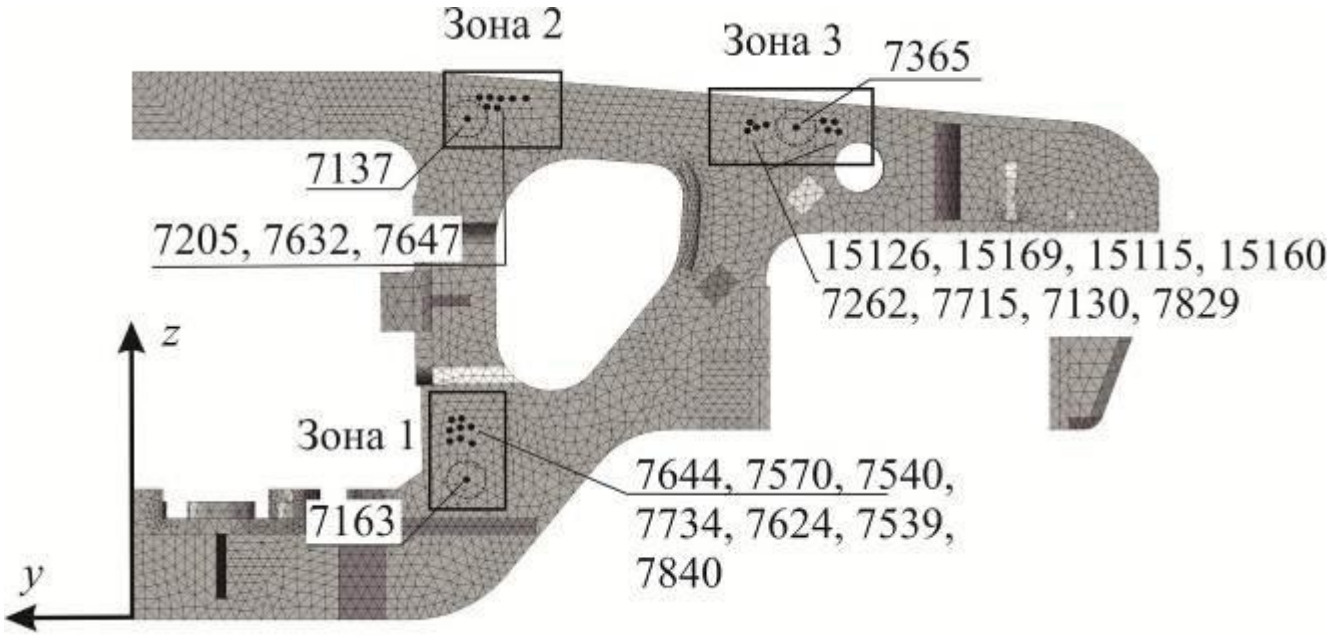


Рисунок 4.7 – Результат анализа зон номер 1, 2 и 3 установки преобразователей акустической эмиссии (в программной среде SolidWorks)

В таблице 4.1 представлены координаты узлов для зоны номер 1, в которых наблюдается максимальная амплитуда приходящего сигнала. При этом узел номер 7163 является центром первоначального положения преобразователя (см. рисунок 4.7).

Таблица 4.1 – Координаты исследуемых узлов модели для зоны номер 1, ПАЭ номер 9 и 12

Номер узла	*x*, мм	*y*, мм	*z*, мм	*Δz*, мм
1	2	3	4	5
7644	-82,5	-380,3	-414,6	-48,2
7570	-82,5	-377,9	-427,4	-35,4
7540	-82,5	-383,6	-401,7	-61,0
7734	-82,5	-376,4	-440,2	-22,6
7163	-82,5	-386,2	-462,7	0
7624	-82,5	-404,0	-442,4	-20,4
7539	-82,5	-401,2	-421,4	-41,3
7840	-82,5	-397,1	-401,5	-61,2

В среднем смещение *Δz* между узлом, в котором, согласно технологическим картам, рекомендуется устанавливать преобразователь акустической эмиссии, и областью с максимальными перемещениями, равно минус 41 мм (ПАЭ необходимо переместить вверх). В таблице 4.2 представлены результаты перемещений исследуемых узлов в момент времени *t*, равный 0,001 с по всем компонентам перемещений всех исследуемых узлов в этой области. Абсолютное значение нормальной компоненты U_x для узла номер 7163,в котором установлен преобразователь, составляет плюс $1{,}1 \cdot 10^{-6}$ м, тогда как среднее значение U_x в области, в которую рекомендуется переместить ПАЭ, составило плюс $2{,}0 \cdot 10^{-6}$ с.

Таблица 4.2 – Перемещения исследуемых узлов в момент времени, равный 0,001 с

Номер узла	Величина нормальных перемещений U_x, $\cdot 10^{-6}$ м	Величина перемещений U_y, $\cdot 10^{-6}$ м	Величина перемещений U_z, $\cdot 10^{-6}$ м	Величина перемещений U_{rez}, $\cdot 10^{-6}$ м
1	2	3	4	5
7644	-2,3	0,1	-0,4	2,4
7570	-2,0	-0,03	-0,6	2,1
7540	-2,1	0,1	-0,4	2,2
7734	-1,6	-0,3	-0,3	1,7
7163	-1,1	-0,4	-0,7	1,4
7624	-1,8	0,09	-1,1	2,1
7539	-2,1	-0,07	-0,8	2,2
7840	-2,3	-0,04	-0,6	2,4
	-2,0	Среднее значение U_x в рекомендуемой области, $\times 10^{-6}$ м		

Рассмотрим следующую зону номер 2, в которую устанавливаются преобразователи акустической эмиссии номер 10 и номер 11 (см. рисунок 4.7). Преобразователи номер 10 и номер 11, симметричные фронтальной плоскости, в зоне номер 2 также находятся в зоне нулевых перемещений - в «зеленом» поле. При этом выше и ниже по осям от этих преобразователей находятся области максимальных и минимальных перемещений (см. рисунок 4.6). В таблице представлены координаты узлов зоны, в которую рекомендуется переместить ПАЭ номер 10 и номер 11 и координаты узла, в который на данный момент устанавливается преобразователь номер 10 и номер 11 (узел номер 7137).

Таблица 4.3 - Координаты исследуемых узлов модели для зоны номер 2

Номер узла	x , мм	y , мм	z , мм	Δz , мм	Δy , мм
1	2	3	4	5	6
7137	-82,5	-399,5	-55,6	0	0
7205	-82,5	-425,5	-29,6	-25,9	25,9
7632	-82,5	-439,6	-30,7	-24,8	40,1
7647	-82,5	-413,0	-29,2	-26,4	13,5
Среднее смещение, мм				-26,0	26,5

По результатам анализа рекомендуется ПАЭ номер 10 и номер 11 переместить выше по оси *z* на 26 мм, по оси *y* в отрицательную область на 26,5 мм (в среднем Δz =-26 мм и Δy =27 мм). В таблице 4.4 представлены результаты перемещений по всем компонентам всех исследуемых узлов в зоне номер 2.

Таблица 4.4 – Перемещения узлов в зоне номер 2 в момент времени, равный 0,001 с

Номер узла	Величина нормальных перемещений U_x, $\cdot 10^{-6}$ м	Величина перемещений U_y, $\cdot 10^{-6}$ м	Величина перемещений U_z,$\cdot 10^{-6}$ м	Величина перемещений U_{rez}, $\cdot 10^{-6}$ м
1	2	3	4	5
7137	-0,7	0,4	0,1	0,8
7205	-1,0	-0,01	0,5	1,1
7632	-0,3	-0,08	0,3	0,4
7647	-1,3	0,4	0,7	1,5
	-0,9	Среднее значение U_x в рекомендуемой области, $\times 10^{-6}$ м		

Таким образом, при перемещении в рекомендуемую зону величина перемещений изменится с минус $0{,}7 \cdot 10^{-6}$ м на минус $0{,}9 \cdot 10^{-6}$ м. То есть величина абсолютных нормальных перемещений, регистрируемых ПАЭ, увеличиться.

Рассмотрим третью зону в плоскости *yz*, в которой устанавливаются преобразователи номер 13 и 16 (зона номер 3 на рисунке 4.7). Местоположение преобразователей акустической эмиссии номер 13 и 16, симметричных фронтальной плоскости, также находится в зоне «нулевых» перемещений. Численные результаты показали, что вблизи ПАЭ номер 13 и 16 есть зоны с экстремальными значениями перемещений – зоны отрицательных перемещений, обозначенные синим цветом и зоны положительных перемещений, обозначенные желтым цветом (см. рисунок 4.6). В этой связи рекомендуется перемещение ПАЭ номер 13 и номер 16 на Δy= 49 мм влево и Δz= 2мм вверх, что позволит переместить центр датчика из зоны «нулевых» перемещений поверхности в область с перемещениями, равными в среднем $1{,}43 \cdot 10^{-6}$ м. Также возможно перемещение центра датчика на Δz = 43 мм вправо, что позволит установить датчик на поверхность с амплитудой в 3 раза большей, чем в настоящем

положении (желтый цвет на шкале). Однако последнее смещение нежелательно, так как датчик окажется на наклонной плоскости боковой рамы.

В таблице 4.5 представлены координаты узла 7365 с координатами (-82,5; -790,4 мм), в который на данный момент устанавливается преобразователь номер 3 и номер 16, а также координаты узлов в рекомендуемых зонах.

Таблица 4.5 – Координаты исследуемых узлов модели для ПАЭ номер 13 и 16

Узел	Координата x, мм	Координата y , мм	Координата z, мм	Δz , мм	Δy , мм
7365	-82,5	-790,4	-66,2	0	0
15126	-79,9	-841,7	-70,7	4,6	51,3
15169	-80,2	-838,0	-59,3	-6,9	47,6
15115	-81,1	-824,4	-57,9	-8,3	34,0
15160	-80,9	-828,1	-69,4	3,2	37,7
7262	-82,5	-753,9	-62,1	-4,1	-36,5
7715	-82,5	-742,7	-66,0	-0,1	-47,6
7130	-82,5	-731,5	-70,0	3,8	-58,8
7829	-82,5	-735,6	-60,0	-6,1	-54,7
Среднее смещение в область 1, мм				42,6	-1,9
Среднее смещение в область 2, мм				-49,4	-1,6

В таблице 4.6 представлены все компоненты перемещений исследуемых узлов в зоне 3 в момент времени, равный t= 0,001 с.

Таблица 4.6 – Перемещения исследуемых узлов в зоне номер 3 в момент времени, равный t= 0,001 с

Номер узла	Величина нормальных перемещений, U_x, $\cdot 10^{-6}$ м	Величина перемещений U_y, $\cdot 10^{-6}$ м	Величина перемещений U_z, $\cdot 10^{-6}$ м	Величина перемещений U_{rez}, $\cdot 10^{-6}$ м
1	2	3	4	5
7365	-0,2	-0,4	-0,02	0,4
15126	0,4	-0,2	0,8	0,9
15169	0,9	-0,2	0,3	1,0
15115	1,0	-0,3	-0,03	1,0
15160	0,6	-0,4	0,3	0,8
	0,7	Среднее значение U_x в рекомендуемой области 1 зоны 3, $\times 10^{-6}$ м		

Продолжение таблицы 4.6

Номер узла	Величина нормальных перемещений U_x, $\cdot 10^{-6}$ м	Величина перемещений U_y, $\cdot 10^{-6}$ м	Величина перемещений U_z, $\cdot 10^{-6}$ м	Величина перемещений U_{rez}, $\cdot 10^{-6}$ м
1	2	3	4	5
7262	-1,1	-0,6	-0,04	1,3
7715	-1,6	-0,2	0,2	1,6
7130	-1,4	-0,1	-0,03	1,4
7829	-1,5	0,07	0,2	1,6
	-1,4	Среднее значение U_x в рекомендуемой области 2 зоны 3, $\times 10^{-6}$ м		

В таблице 4.7 представлены обобщённые данные для трех рассмотренных выше зон, для каждого случая приводится коэффициент K_t, полученный с помощью численного расчета, и показывающий, во сколько раз увеличится амплитуда регистрируемой волны при перемещении ПАЭ в рекомендуемую область. В столбце 2 таблицы 4.7 приведены величина U_x абсолютных перемещений поверхности по нормали, в местах, где на данный момент в соответствии с технологическими картами регламентируется установка ПАЭ, а в столбце 3 – усредненные перемещения узлов в областях, в которые по результатам примененного численного анализа рекомендуется перенести центры ПАЭ. В столбце 4 показано процентное соотношение перемещений из столбцов 2 и 3, дающее искомый коэффициент K_t.

Таблица 4.7 – Коэффициент K_t, показывающие, во сколько раз увеличится амплитуда регистрируемой волны при перемещении преобразователя в рекомендуемую область

Зона, номер ПАЭ по схеме	Величина нормальных перемещений U_x, $\cdot 10^{-6}$ м	Величина перемещений U_x, $\cdot 10^{-6}$ м	Коэффициент K_t, отн. ед.
1	2	3	4
Зона 1, №9(12)	-1,1	-2,0	1,8
Зона 2, №10(11)	-0,7	-0,9	1,2
Зона 3, №13(16) область 1	-0,2	0,7	-3,4
Зона 3, №13(16) область 2	-0,2	-1,4	6,5

Учитывая результаты конечно-элементного расчета, можно сделать следующие рекомендации:

1. Преобразователи акустической эмиссии номер 9 и номер 12, симметричные фронтальной плоскости, в зоне номер 1 следует установить по оси z в область положительных значений на 41 мм, при этом преобразователь окажется в зоне максимальных отрицательных перемещений, абсолютное перемещение увеличится от минус 1 до минус 2 мкм, K_t=2.

2. Преобразователи акустической эмиссии номер 10 и номер 11, симметричные фронтальной плоскости, также находятся в зоне нулевых перемещений в «зеленом» поле. Рекомендуемые перемещения ПАЭ номер 10 и номер 11 равны: по оси z, на z = 26 мм в положительную область оси, и по оси y, на y =-26,5 мм в отрицательную область оси. При перемещении ПАЭ K_t=1,2.

3. Рекомендуется перемещение ПАЭ номер 13 и номер 16 в зоне номер 3 составляет: по оси y, на y = 49 мм в положительную область оси, и по оси z, на z=2 мм в положительную область оси, что позволит переместить центр датчика из зоны «нулевых» перемещений поверхности в область с перемещениями, равными в среднем $1{,}43 \cdot 10^{-6}$ м. В этом случае K_t=-3,4.

Так как боковая рама является симметричным объектом, то данные рекомендации должны применяться относительно датчиков номер 3, 4, 5, 6, 7, 8. Так как величина электрического напряжения на входе системы пропорционально зависит от величины перемещения поверхности объекта контроля, которое воспринимает преобразователь, то можно ожидать, что чувствительность преобразователей, а, значит, и точность контроля, возрастет при установке в рекомендуемых в соответствии с результатами данной работы областях.

4.3 Экспериментальные исследования распространения волн при испытаниях боковой рамы тележки грузового вагона

Для проведения эксперимента была выбрана боковая рама тележки грузового вагона модели 18-100 (см. рисунок 4.8). В ходе эксперимента изучалось

влияние смещения преобразователей акустической эмиссии в соответствии с рекомендациями численного расчета на параметры регистрируемых сигналов.

Объект, на который устанавливалась антенна преобразователей акустической эмиссии был свободно установлен на опору.

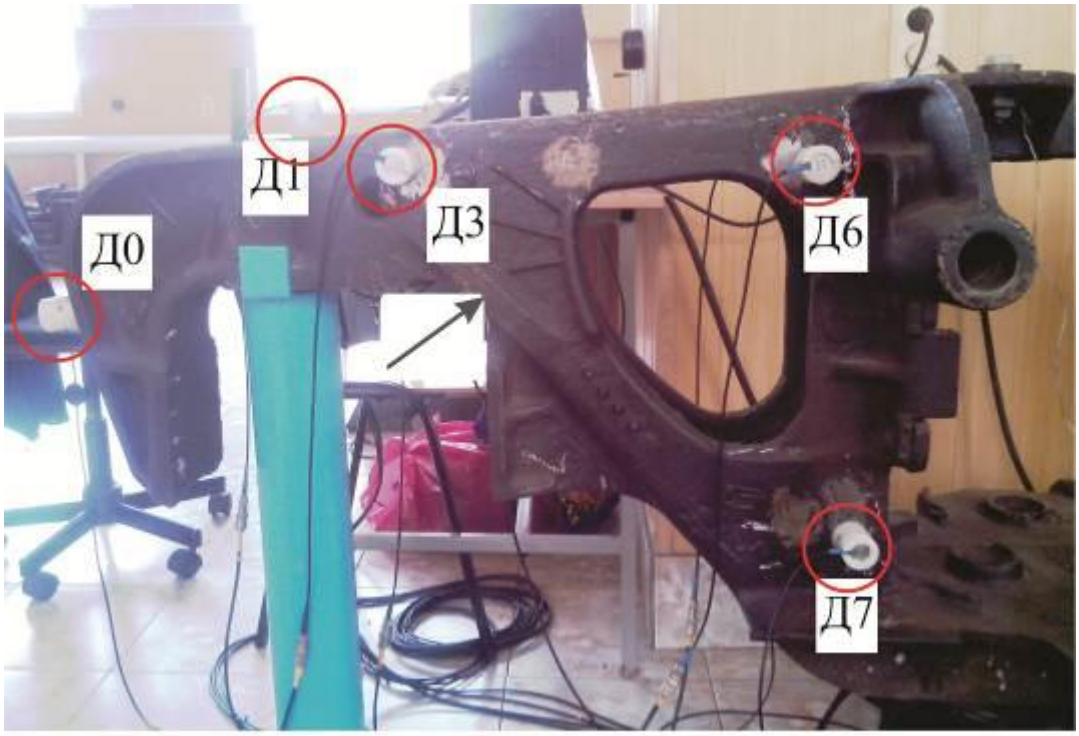
На боковой раме были размещены восемь преобразователей акустической эмиссии номер 0, 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7 в корпусе с магнитами. Сначала преобразователи были установлены согласно технологической инструкции по проведению акустико-эмиссионного контроля боковых рам тележек грузовых вагонов (см. рисунок 4.2).

Первый эксперимент был проведен при первоначальном положении преобразователей, регламентированном технологической инструкцией, что показано на рисунке 4.8 а. Сигнал акустической эмиссии генерировался изломом хрупкого грифеля, выдвинутого из цангового карандаша, стрелкой показано место излома, оно было посередине буксового проема.

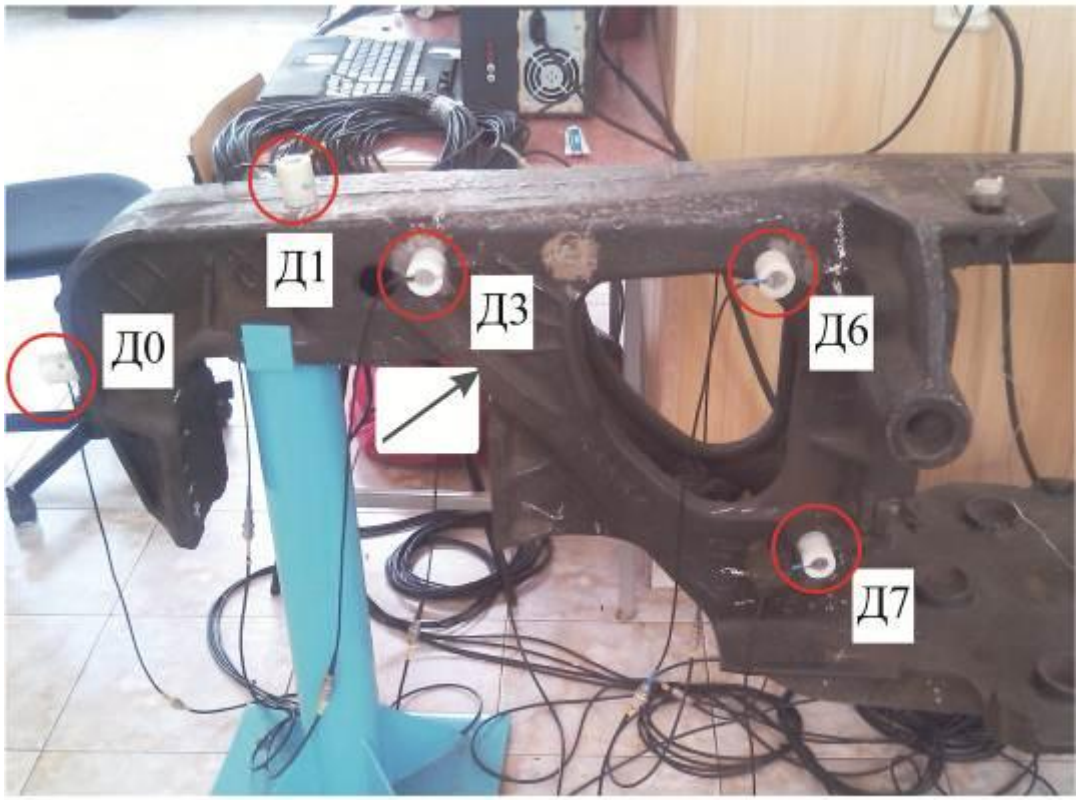
Настройки системы и каналов были выбраны и созданы согласно Методическим указаниям к проведению акустико-эмиссионного контроля объектов железнодорожного транспорта.

После калибровки антенны были записаны результаты серии изломов грифеля системой акустико-эмиссионной СЦАД-16.02. Вид зарегистрированных сигналов представлен на рисунке 4.9 для каждого из восьми каналов. Размах на каждом из каналов для от Д0 до Д7 обозначен как R0 - R7 (см. рисунок 4.10). Их значение приведено в окне программы. Ближайшие к источнику ПАЭ регистрируют сигнал с большей амплитудой (приблизительно 4000 мВ), чем отдаленные ПАЭ (Д4,Д5,Д6,Д7), размах на которых составляет от 400 до 1600 мВ.

Для статистической обработки результатов и обеспечения получения достоверных результатов измерения было проведено 20 изломов грифеля при таком положении преобразователей. Результаты размахов на каждом из восьми каналов сведены в таблицу 4.8.



а



б

Рисунок 4.8 – Боковая рама тележки грузового вагонам при проведении эксперимента

а – первоначальное положение преобразователей АЭ (первый эксперимент),

б – смещенное положение преобразователей АЭ (второй эксперимент)

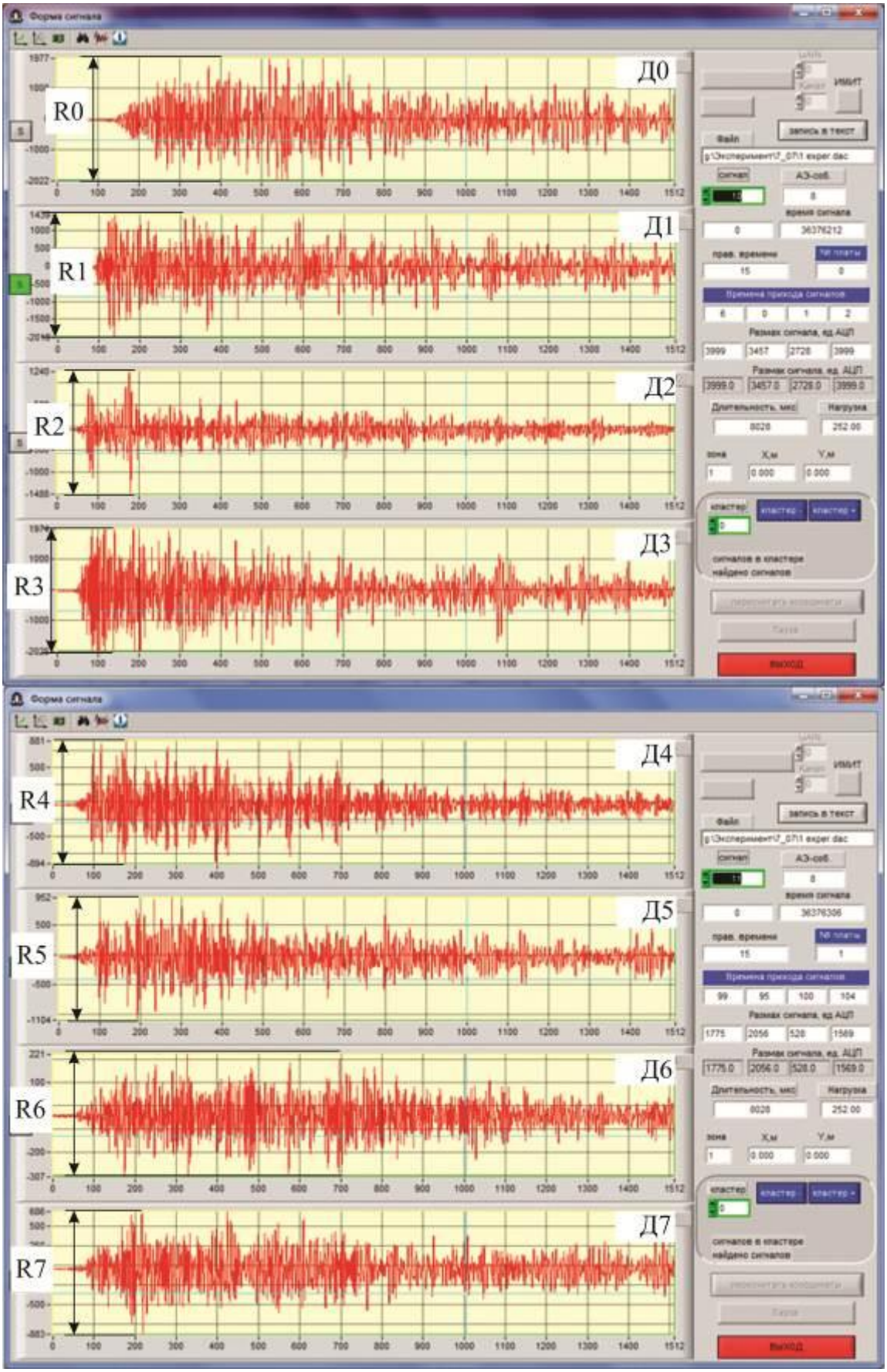


Рисунок 4.9 – Зарегистрированные сигналы для восьми датчиков Д0 – Д7 от излома грифеля. Первый эксперимент (без смещения ПАЭ)

Также из рисунка видно, что сигнал с небольшим запаздыванием приходит на датчик Д0, это связано с местоположением преобразователя и направленностью источника.

Во втором эксперименте согласно рекомендациям, полученным численно, преобразователи были сдвинуты на рекомендуемые величины, приведенные в таблицах 4.1, 4.3, 4.5, их положение при эксперименте показано на рисунке 4.8 б. Остальные условия эксперимента не изменялись, место излома грифеля не изменялось, параметры настройки каналов также не изменялись. Зарегистрированные акустико-эмиссионной системой СЦАД-16.02 сигналы показаны на рисунке 4.10.

Для оценки влияния изменения координат преобразователей в акустической антенне на результаты проведения АЭ контроля и на точность локализации сигналов, были проанализированы 20 серий изломов для первого и второго экспериментов. Анализировался размах сигналов. В таблице 4.8 приведены экспериментальные данные размахов для 20 изломов соответственно первого и второго эксперимента.

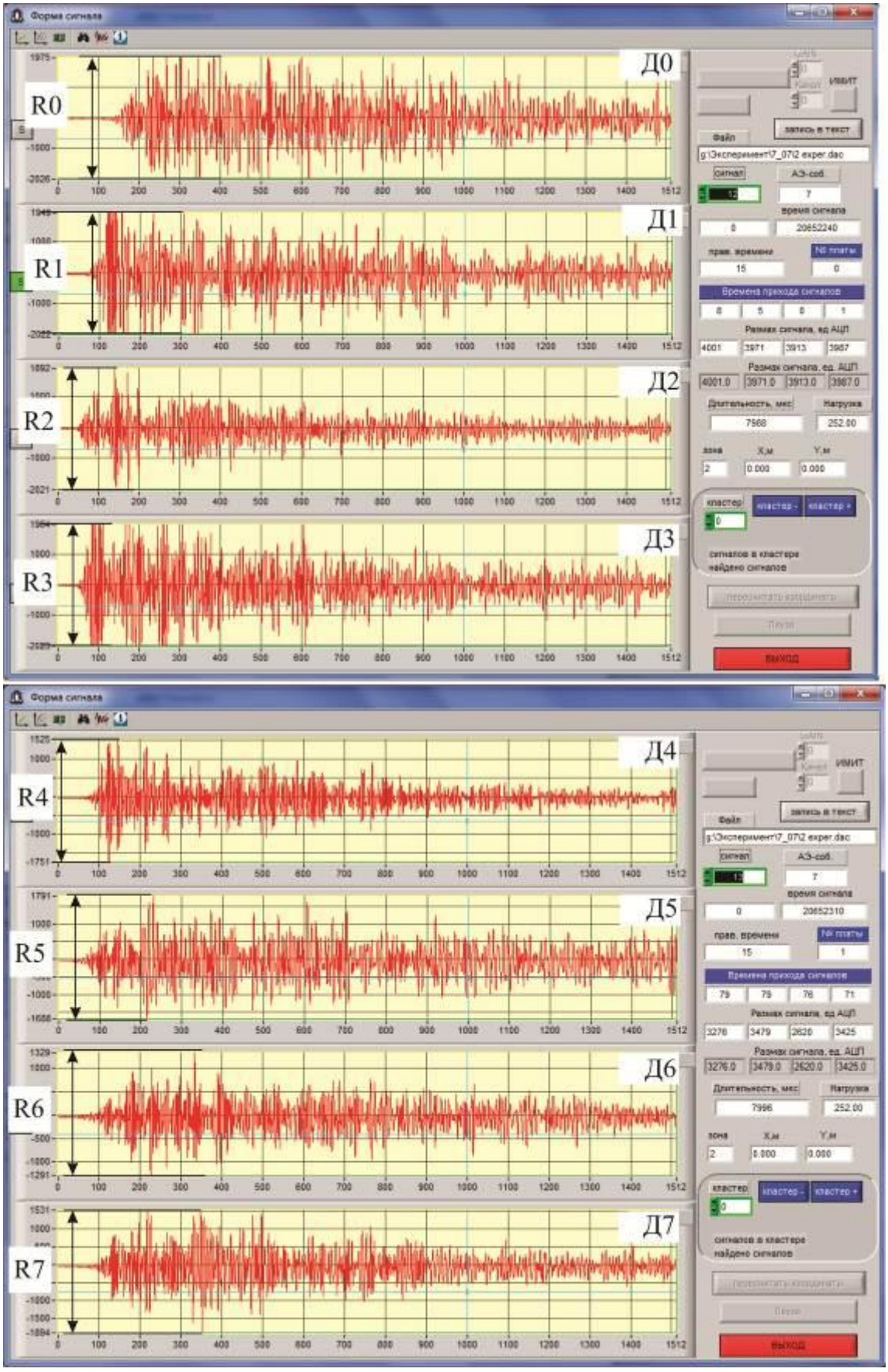


Рисунок 4.10 – Зарегистрированные сигналы для восьми датчиков Д0 – Д7 от излома грифеля. Второй эксперимент (со смещением ПАЭ)

Таблица 4.8 – 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	
1	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
4	3999	4001	3973	3971	2521	3913	3991	3987	2325	3276	2732	3479	631	2620	2381	3421
5	2276	3801	1800	3953	1140	2523	2369	3971	639	1837	768	2752	204	1726	597	2551
6	3438	4006	3582	3979	2010	3917	3984	3990	1378	3681	1999	3685	470	3659	1515	4008
7	4015	2767	3985	3850	3006	2128	3995	3583	2121	1984	2506	1970	634	1187	2155	1629
8	4005	3996	3975	3962	3178	1991	3986	3974	1959	1668	2335	2580	585	1575	1670	2256
9	3984	4002	3968	3972	1838	3927	3975	3990	1074	2296	1445	4054	351	2522	1114	3909
10	4004	4007	3968	3966	2472	3920	3989	3991	2576	2202	2489	3781	776	1970	3178	2865
11	3794	4006	3182	3977	2123	3925	3991	3993	1517	2924	1726	3847	501	3833	1542	3814
12	4011	3996	3975	3966	3307	3916	3992	3977	2632	2348	2970	3582	783	1997	2141	4058
13	3999	4016	3961	4006	2522	3948	3986	4012	1618	4064	1835	4066	544	4062	1440	4063
14	4002	3999	3608	3977	2631	3512	3990	3987	2206	2807	2431	3501	687	2322	1705	3368
15	4004	4000	3955	3976	3016	3875	3990	3993	1893	3278	2510	3587	626	2273	2193	3824
16	4006	4004	3966	3975	2908	3910	3985	3988	3192	3071	3142	4054	2385	2740	3172	3807
17	4009	4001	3975	3972	3128	3664	3988	3985	2410	2409	2695	3930	733	2341	2436	3285
18	4002	4008	3983	3981	2379	3925	3992	3990	2062	3639	2278	4058	606	2707	1939	4065
19	4014	4002	3984	3976	3853	3929	3995	3989	2514	3978	2999	4042	816	2630	2318	4060
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, отн. ед.	1,02		1,08		1,43		1,02		1,50		1,64		3,97		1,86	

В таблице 4.8 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 преобразователей. 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 преобразователей.

В последней строке приведен коэффициент K_r, показывающий во сколько раз увеличивается среднее значение размаха по каждому из каналов при перестановке преобразователей согласно рекомендациям, изложенным в п.4.2 по результатам применения алгоритмов численного моделирования.

Анализ результатов показывает, что на всех каналах наблюдается положительная динамика чувствительности, на каналах 4,5,6,7, чувствительность увеличивается значительно более чем на 50 процентов.

4.4 Алгоритм калибровки преобразователей при проведении акустико-эмиссионного контроля

Наиболее важной и распространённой в практике неразрушающего контроля характеристикой преобразователей акустической эмиссии является амплитудно-частотная характеристика (АЧХ). Трудность калибровки преобразователей акустической эмиссии состоит в том, что необходимо получить амплитудно-частотную характеристику для достаточно широкополосного преобразователя. Чем шире частотный спектр преобразователя, тем более высокие требования необходимо предъявить к источнику акустического сигнала. Как правило, источником акустического сигнала точно так же выступает пьезоэлектрический преобразователь, который и сам обладает определенной амплитудно-частотной характеристикой в режиме излучения. В связи с этим при калибровке преобразователя возникает необходимость такого излучателя сигнала, который имеет равномерный уровень сигнала на всех частотах.

При этом основные документы в области неразрушающего контроля и акустико-эмиссионной диагностики не устанавливают требования к амплитудно-частотной характеристике излучателя. В [73] источником является излом стеклянной капиллярной трубки, согласно требованиям ГОСТ 52727-2007 – это излом графитового стрежня. Понятно, что нормировать амплитудно-частотную характеристику такого рода источников затруднительно.

Амплитудно-частотная характеристика в настоящее время определяется, как правило, только при первичной поверке преобразователей. При этом перед проведением контроля проверить АЧХ затруднительно, так как в соответствии с существующими способами для этого требуется сложное оборудование. В то же время контроль за параметрами АЧХ является необходимым, так как изменение АЧХ может приводить к существенным искажениям сигнала, и потери точности АЭ контроля. В связи с этим разработка относительно простого способа определения АЧХ является актуальной задачей.

Для решения обозначенной проблемы был выбран механический способ возбуждения акустических волн при калибровке. При этом источником сигнала являлись механические взаимодействия специальной насадки с объектом контроля на различных частотах. На рисунке 4.11 представлена схема эксперимента. Эксперимент проводился с использованием массивного объекта контроля 1 (см. рисунок 4.11). Преобразователь для калибровки устанавливался на боковой раме тележки грузового вагона модели 18-100. Для калибровки был выбран серийный преобразователь 2 (использован ПАЭ GT300 номер 9003 производства ООО «Глобал Тест»). Использовался ПАЭ утвержденного типа, имеющий паспорт и свидетельство о поверке. Насадка с мелкозернистым напылением 6, установленная на валу 5, вводилась в механический контакт с объектом контроля. Насадка и вал вращались с помощью генератора 4. Был использован генератор Г3-111, частота вращения вала 5 составляла 1000 об/мин. С калибруемого преобразователя 2 сигнал поступал в предварительный усилитель 8, и далее, для обработки, – в систему 9.

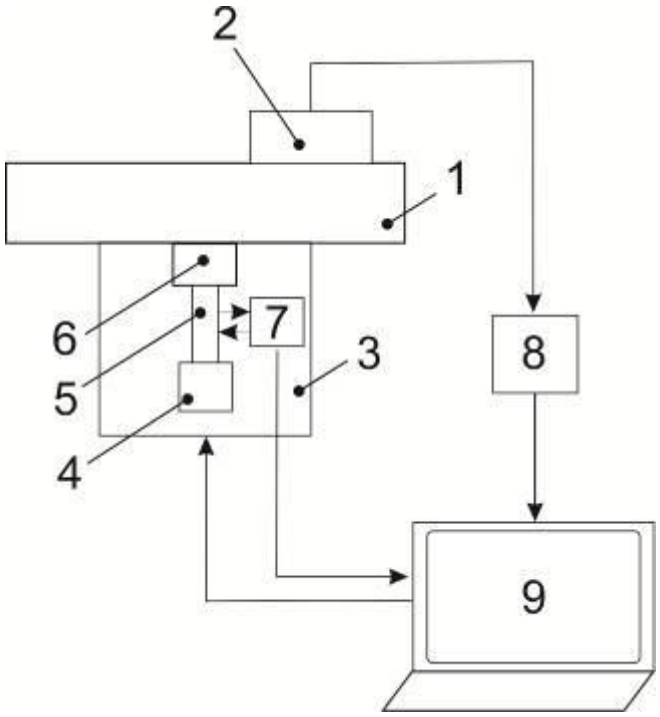


Рисунок 4.11 – Схема проведения эксперимента

В процессе эксперимента были использованы различные насадки, и подобраны оптимальные, которые обеспечивали генерацию акустического сигнала на всех частотах. Для регистрации сигналов использовалась акустико-эмиссионная система СЦАД-16.02. Приходящие на преобразователь сигналы оцифровывались в системе. Частота оцифровки составляла 2 МГц.

В процессе экспериментов исследовали характеристики преобразователей акустической эмиссии типа: ПП 0,1-0,7 (канал номер 6), ПП-001 (канал номер 5), GT300 (канал номер 4), коэффициенты усиления для всех преобразователей были равны 5 и не изменялись в процессе.

Перед проведением испытаний проводили проверку чувствительности акустико-эмиссионных каналов с помощью имитатора Су-Нильсена по [33]. Наибольшая амплитуда АЭ сигналов (рисунок 4.12) зарегистрирована для преобразователя ПП-001: 323 мкВ, наименьшая – 69 мкВ для ПП 0,1-0,7. Все преобразователи были подключены к акустико-эмиссионной системе СЦАД-16.02 и находились на равном расстоянии от источника. Сигналы были зарегистрированы практически одновременно, с задержкой по времени прихода не более 2 мкс.

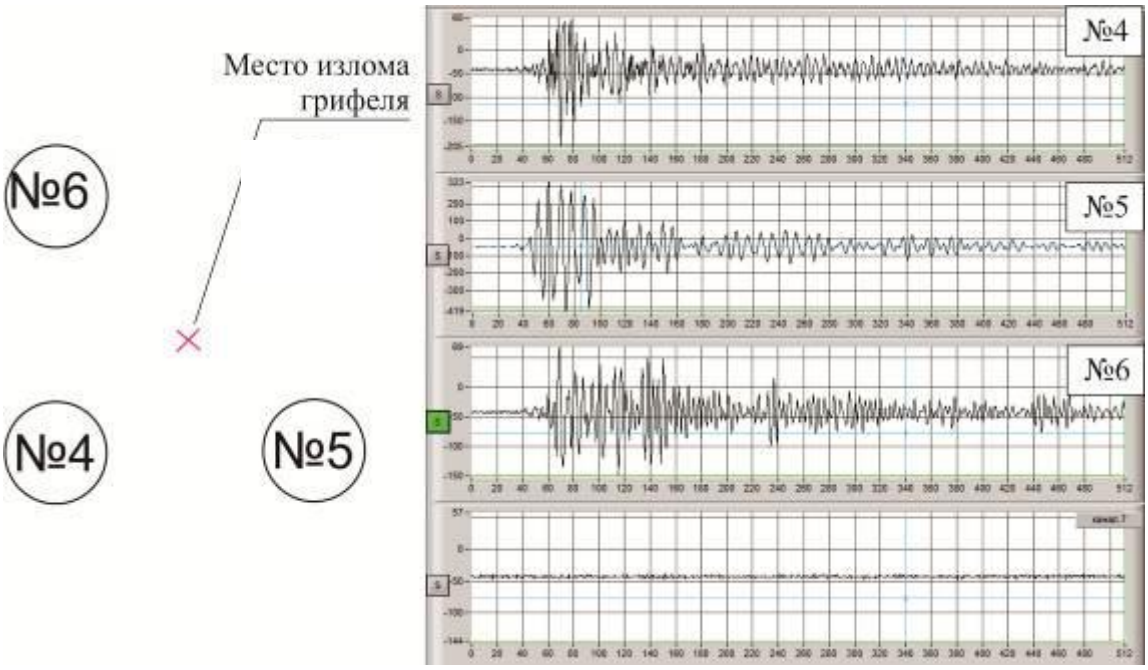


Рисунок 4.12 – Форма зарегистрированного сигнала

Далее исследовались непрерывные сигналы АЭ при реализации схемы, представленной на рисунке 4.11. Эти данные с помощью алгоритма [71] обрабатывались, выполняя преобразование в частотный диапазон. Полученная при этом амплитудно-частотная характеристика графически представлена кривой 1 на рисунке 4.13, кривые 2 и 3 – паспортные данные амплитудно-частотной характеристики преобразователя GT300 номер 9003. С помощью математической обработки выделена частотная область от 100 до 800 кГц.

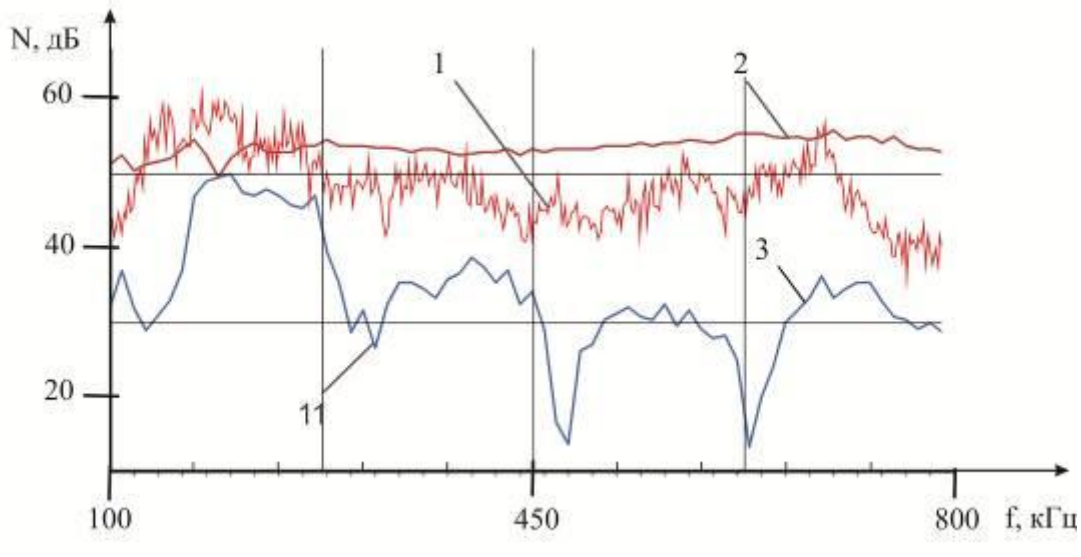


Рисунок 4.13 – Результаты предлагаемой относительной калибровки преобразователей при проведении акустико-эмиссионного контроля

Кривые на рисунке 4.13 демонстрируют корреляцию полученных характеристик с паспортными метрологическими характеристиками калибруемого преобразователя GT300 номер 9003. Как видно из графика характеристики близки, отклонений в метрологических характеристиках не наблюдается, ПАЭ может быть использован в дальнейшем в эксплуатации.

Данный способ защищен патентом Российской федерации №2554320 (Приложение Б) и может быть применен для проведения абсолютной калибровки, когда полученные данные для калибруемого преобразователя сравниваются с подобными данными для образцового преобразователя.

Таким образом, по сравнению с существующими методиками, предлагаемая методика калибровки исключает влияние на результаты калибровки нестабильности характеристик источника акустического сигнала, что не было исключено даже при первичной поверке, также исключает влияние на результаты относительной калибровки АЧХ образцового преобразователя, позволяет проводить экспериментальное определение амплитудно-частотной характеристики калибруемого преобразователя за счет получения необходимых экспериментальных данных амплитудного распределения сигналов в широком диапазоне частот. Кроме того, существенным преимуществом является отсутствие жестких требований к геометрии и характеристикам калибровочного блока, что позволит делать калибровку преобразователей в рабочих условиях «на местах», в том числе проводить калибровку преобразователей акустической эмиссии на литых деталях тележки грузового вагона.

4.5 Выводы по разделу 4

В разделе получены результаты конечно-элементного расчета распространения акустико-эмиссионной волны в боковой раме тележки грузового вагона. При этом анализируются те зоны, в которых по технологическим инструкциям в настоящее время устанавливаются преобразователи акустической эмиссии. Для этих зон получены подробные результаты векторов перемещений.

Согласно полученным ранее рекомендациям преобразователи акустической эмиссии в двух зонах рекомендовано переместить в области с максимальными нормальными перемещениями поверхности.

Проведено две серии экспериментов акустико-эмиссионного контроля боковой рамы тележки грузового вагона, для первой серии экспериментов преобразователи устанавливались штатно (согласно технологическим инструкциям). Для второй серии экспериментов преобразователи были сдвинуты на рекомендуемую величину на боковой раме тележки грузового вагона. Для каждой зоны получены коэффициенты, показывающие, насколько увеличивается размах сигнала при использовании рекомендаций данной работы. Для полученных экспериментальных данных коэффициент увеличения амплитуды значительно больше единицы, при этом на каналах 4,5,6,7 чувствительность увеличивается более, чем на 50 процентов.

Данные результаты показывают, что рекомендации, полученные в ходе исследования с помощью численного моделирования, получили экспериментальное подтверждение. Данные алгоритмы численного моделирования распространения акустических волн могут быть использованы при разработке технологий НК для других объектов. При этом форма объекта контроля может быть произвольной. Полученные картины распределений деформаций, перемещений или напряжений могут использоваться для научных и технологических задач. При этом численное моделирование дает возможность прогнозирования отклика объекта на любое динамическое воздействие, сокращает трудовые и экономические ресурсы на проведение испытаний.

В работе приведены результаты экспериментальных исследований АЧХ ПАЭ с использованием механического источника непрерывного шума. Проанализированы АЧХ калибруемого преобразователя в условиях регистрации продольных, поверхностных и нормальных волн Лэмба. Получены сравнительные результаты паспортной и экспериментальной АЧХ. Кроме того, рекомендации данного исследования применены на предприятиях АО «ВРК-1», что подтверждается актом внедрения (приложение В).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Основные научные выводы и практические рекомендации заключаются в следующем:

1. Получена методика расчета элементов акустического тракта преобразователя акустической эмиссии, для одиночного пьезоэлемента получен отклик на приход на него двух типов волн – продольной и поперечной, получены результаты прохождения волны в слоистой структуре преобразователя при приходе на него продольной волны.

2. Предложен, реализован и отработан на тестовых моделях алгоритм прохождения акустико-эмиссионных волн в одномерных, двумерных, трехмерных моделях неразрушающего контроля. Получены результаты моделирования распространения акустико-эмиссионных волн в моделях с концентраторами напряжений и моделями трещин.

3. Получены сравнительные результаты аналитического и численного расчета распространения акустико-эмиссионных волн для объемной модели.

4. Полученные результаты распространения акустико-эмиссионной волны в боковой раме тележки грузового вагона позволили дать рекомендации по оптимальному расположению преобразователей при проведении акустико-эмиссионного контроля. Полученные экспериментальные результаты подтверждают результаты численного моделирования.

5. Предложена конструкция магнитной системы и преобразователя АЭ, позволяющая улучшить чувствительность преобразователя акустической эмиссии, а также продлить срок службы преобразователя и его долговечность.

6. Предложен способ калибровки преобразователей акустической эмиссии, который возможно применять непосредственно на объекте

контроля любой формы в производственных условиях. С использованием данного способа можно проводить относительную калибровку ПАЭ.

Из вышеизложенного следует, что исследование распространения акустических волн в твердых телах с геометрическими неоднородностями, неоднородностями свойств и структуры самого материала является актуальным и позволяет повысить достоверность результатов неразрушающего контроля.

Численное моделирование процесса распространения акустических волн дает возможность прогнозировать характер перемещений точек поверхности объекта контроля, и, соответственно, обосновывать места установки датчиков, используемых для регистрации сигналов АЭ.

Результаты численного моделирования хорошо согласуются с известными аналитическими выражениями и экспериментальными данными, полученными в результате выполнения диссертационной работы.

Выполненные исследования позволили значительно расширить область применения численных методов в практике неразрушающего контроля. Использование данных результатов и рекомендаций позволяют повысить точность и достоверность проведения акустико-эмиссионного неразрушающего контроля за счет повышения чувствительности преобразователей акустической эмиссии и оптимизации их расположения на объекте контроля.

Таким образом, предлагаемый подход позволяет повысить достоверность получаемой информации и упрощает контроль объектов сложной геометрической формы.

СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ И УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ

АЭ – акустико-эмиссионный

ПАЭ – преобразователь акустической эмиссии

УЗК – ультразвуковой контроль

АЭК – акустико-эмиссионный контроль

ПЭП – пьезоэлектрический преобразователь

НК – неразрушающий контроль

ОК – объект контроля

МКЭ – метод конечных элементов

МГЭ – метод граничных элементов

КЭ – конечно элементная

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1 Акопьян, В. А. Влияние геометрии и способов подключения электродов на электромеханические характеристики перестраиваемых по частоте дисковых пьезоэлементов / В. А. Акопьян , А. В. Наседкин, Е. В. Рожков, А. Н. Соловьев, А. С. Шевцов // Дефектоскопия. – 2006. – №5. – С. 63 – 72. — ISSN 0130–3082.

2 Акустико-эмиссионный контроль авиационных конструкций / А.Н. Серьезнов, Л.Н. Степанова, С. И. Кабанов и др.; под ред. Д.т.н. Л. Н. Степановой, А. Н. Серьезнова. – М.: Машиностроение / Машиностроение - Полет, 2008. - 440 с.: ил.

3 Акустико-эмиссионный контроль железнодорожных конструкций / А.Н. Серьезнов, Л.Н. Степанова, В.В. Ивлиев и др. – Новосибирск: Наука, 2011. – 272 с.

4 Акустическая эмиссия. Применение для испытаний материалов и изделий / В.А. Грешников, Ю.В. Дробот. – М.: Изд-во стандартов, 1976. – 272 с.

5 Баев, А. Р. Особенности отражения акустического пучка от поверхности с неоднородными граничными условиями. I. Теоретический анализ / А. Р. Баев, М. В. Асадчая // Дефектоскопия. – 2010. – №8. – С. 3 – 17. – ISSN 0130–3082.

6 Баев, А. Р.Особенности отражения акустического пучка от поверхности с неоднородными граничными условиями. II. Экспериментальные исследования / А. Р. Баев, А. Л. Майоров, М. В. Асадчая, Г. Е. Коновалов // Дефектоскопия. – 2010. – №8. – С. 18 – 27. – ISSN 0130–3082.

7 Балабаев, С. М. Анализ акустического излучения круглых пьезопластин в плоском жестком экране / С. М. Балабаев, Н. Ф. Ивина // Дефектоскопия. – 2011. – №4. – С. 57 – 69. – ISSN 0130–3082.

8 Балабаев, С. М. Численный анализ дисперсионных соотношений нормальных волн цилиндрического пьезоэлектрического волновода / С. М. Балабаев, Н. Ф. Ивина // Дефектоскопия. – 2010. – №4. – С. 45 – 49. – ISSN 0130–3082.

9 Баркова, Н.А. Неразрушающий контроль технического состояния горных машин и оборудования; учебн. пособие / Н. А. Баркова, Ю. С. Дорошев. - Владивосток, 2009. - 157 с.

10 Бархатов, В. А. Модели формирования ультразвуковых сигналов в задачах реконструкции изображений // Дефектоскопия. – 2005. – №1. – С. 10 – 19. – ISSN 0130–3082.

11 Бархатов, В. А. Расчет ультразвукового поля преобразователя в импульсном режиме // Дефектоскопия. – 2005. – №7. – С. 3 – 12. – ISSN 0130–3082.

12 Бархатов, В. А. Решение динамических задач акустики методом конечных разностей во временной области. Основные соотношения. Анализ погрешностей [Текст] //Дефектоскопия. – 2005. – №3. – С. 12 – 26. – ISSN 0130–3082.

13 Бархатов, В. А. Электромеханическая модель преобразователя // Дефектоскопия. – 2011. – №8. – С. 3 – 15. – ISSN 0130–3082.

14 Беликов, В. Т. Использование амплитудно-частотного спектра акустической эмиссии для восстановления функции распределения трещин по размерам / В. Т. Беликов, Д. Г. Рывкин // Дефектоскопия. – 2010. – №10. – С. 26 – 33. – ISSN 0130–3082.

15 Беликов, В. Т. Моделирование процессов акустической эмиссии в твердом теле // Дефектоскопия. – 2008. – №6. – С. 76 – 85. – ISSN 0130–3082.

16 Белоконь, А.В. Симметричные схемы конечно-элементного анализа пьезоэлектрических устройств с учетом внешних электрических цепей и акустических нагрузок / А.В. Белоконь, А.В. Наседкин, А.С. Даниленко // ВестникСамГУ—Естественнонаучнаясерия. - 2007. - №4(54). - С. 56-65. – ISSN 1810-5378.

17 Березин, А. В. Акустическая эмиссия и деструкция пластически деформированного металла / А. В. Березин, А. И. Корзинкина, Л. М. Рыбакова //Дефектоскопия. – 2004. – №3. – С. 9 – 16. – ISSN 0130–3082.

18 Бехер, С.А. Зависимость числа импульсов аэ при механических испытаниях колец подшипников буксового узла / С.А. Бехер, Е.С. Тенитилов // Дефектоскопия. – 2006. – № 8. – С. 54-62.

19 Бехер, С.А. Использование эффекта акустоупругости при исследовании механических напряжений в рельсах // С.А. Бехер, А.Н. Курбатов, Л.Н. Степанова // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2013. – № 2 (50). – С. 104-111.

20 Богуш, М.В. Анализ функции преобразования пьезоэлектрических датчиков давления методом конечных элементов / М.В. Богуш, Э.М. Пикалев // Известия ЮФУ. Технические науки. - 2008. - № 2 (79). - С. 74-84.

21 Буденков, Г. А. Акустическая дефектоскопия прутков с использованием многократных отражений / Г. А. Буденков, О. В. Недзвецкая, Б. А. Буденков, Т. Н. Лебедева, Д. В. Злобин //Дефектоскопия. – 2004. – №8. – С. 50 – 56. – ISSN 0130–3082.

22 Буденков, Г.А. Динамические задачи теории упругости / Г.А. Буденков, О.В. Недзвецкая. - М.: Изд-во физико-математической литературы , 2004. - 136 с.

23 Буйло, С. И. Связь параметров акустической эмиссии растущей трещины с коэффициентом интенсивности напряжений и типом напряженного состояния // Дефектоскопия. – 2006. – №3. – С. 44 – 48. – ISSN 0130–3082.

24 Ваньков, Ю. В. Собственные частоты изделия как информативный признак наличия дефектов / Ю. Б. Ваньков, Р. Б. Казаков, Э. Р. Яковлева // Техническая акустика. - 2003. - №5. - С.2-7.

25 Ватульян, А. О. Об определении местоположения и размеров полости в упругом стержне / А. О. Ватульян, Н. О. Солуянов // Дефектоскопия. – 2005. – №9. – С. 44 – 56. – ISSN 0130–3082.

26 Викторов, И.А. Физические основы применения ультразвуковых волн Рэлея и Лэмба в технике. - М.: Наука, 1966. - 169 с.

27 Вознесенский, А.С. Компьютерное моделирование термонапряжений в геоматериале, как источников акустической эмиссии / А.С. Вознесенский, С.В. Вильямов, Я.О. Куткин // Горный информационно-аналитический бюллетень. Mining informational and analytical bulletin. - 2011. - №8. - С.181-188.

28 Герасимов, С.И. Численные методы расчета и оптимизации процессов, протекающих при забивке стержней во время подкрепления вертикальных откосов / С.И. Герасимов, Т.В. Сыч // Проблемы оптимального проектирования сооружений доклады 3-й Всероссийской конференции. Новосибирский государственный архитектурно-строительный университет (Сибстрин), Сибирское отделение Российской академии архитектуры и строительных наук, Сибирское отделение международной академии наук высшей школы; ответственный за выпуск Гребенюк Г. И. - 2014. - С. 84-91.

29 Глазырин, В.П. Моделирование ударного нагружения неоднородных пластин / В.П. Глазырин, М.Ю. Орлов, Ю.Н. Орлов // Вычислительные технологии. – Т.7, Ч.2, спец. выпуск. – 2002. – С. 154-162.

30 Горкунов, Э. С. Применение магнитных и электромагнитно-акустических методов для оценки пластической деформации при циклическом нагружении отожженной среднеуглеродистой стали / Э.С. Горкунов, Р.А. Саврай, А.В. Макаров, С.М. Задворкнн, С.В. Смирнов, С.А. Роговая, М.Н. Соломеин // Дефектоскопия. – 2006. – № 5. – С. 29-36.

31 ГОСТ 27655-88 Акустическая эмиссия. Термины, определения и обозначения. - М.: Издательство стандартов, 1988. - 14 с.

32 ГОСТ 18353-79. Контроль неразрушающий. Классификация видов и методов. - Введ. 1980-07-01.- М.: Издательство стандартов, 1987. - 7 с.

33 ГОСТ Р 52727-2007 Техническая диагностика. Акустико-эмиссионная диагностика. Общие требования. - Введ. 2007-10-01. - М.: Стандартинформ, 2007. - 18 с.

34 Гримс, М. Ультразвуковой метод определения модулей упругости. Численное моделирование и экспериментальные результаты / М. Гримс, С. Хаддад, А. Бухаджера // Дефектоскопия. – 2010. – №12. – С. 78 – 92. – ISSN 0130–3082.

35 Данилов, В. Н. К оценке эффективного размера пьезопластины прямого преобразователя // Дефектоскопия. – 2005. – №6. – С. 11 – 16. – ISSN 0130–3082.

36 Данилов, В. Н. Моделирование работы прямого преобразователя с фазированной решеткой в режиме излучения / В. Н. Данилов, И. В. Воронков // Дефектоскопия. – 2010. – №7. – С. 3 – 17. – ISSN 0130–3082.

37 Данилов, В. Н. Программа компьютерного моделирования работы электроакустических трактов дефектоскопов «ИМПУЛЬС+»// Дефектоскопия. – 2006. – №3. – С. 37 – 43. – ISSN 0130–3082.

38 Диагностика объектов транспорта методом акустической эмиссии // А. Н. Серьезнов, Л. Н. Степанова, В. В. Муравьев и др.; Под ред. Л. Н. Степанова, В. В муравьева. - М.: Машиностроение / Машиностроение - Полет, 2004. - 368 с.: ил.

39 Дякин, В. В. Асимптотика электромагнитного поля в задачах дефектоскопии / В. В. Дякин, О. В. Умергалина // Дефектоскопия. – 2005. – №9. – С. 91 – 94. – ISSN 0130–3082.

40 Дякин, В. В. Поле конечного дефекта в трехмерном полупространстве / В. В. Дякин, О. В. Умергалина, В. Я. Раевский // Дефектоскопия. – 2005. – №8. – С. 28 – 42. – ISSN 0130–3082.

41 Илларионова, Л.В. Численное решение задачи оптимального управления стационарными акустическими полями / Вестник Тихоокеанского государственного университета. – 2011. – № 4. – С. 13-22.

42 Ильгамов, М. А. Отражение продольной бегущей волны от надреза в стержне / М. А. Ильгамов, А. Г. Хакимов // Техническая акустика. – 2008. – Т.16. – С. 16. - ISSN 1819-2408.

43 Ильгамов, М. А. Отражение продольной волны от надреза в стержне, погруженном в вязкую жидкость / М. А. Ильгамов, А. Г. Хакимов // Вычислительная механика сплошных сред. Computational Continuum Mechanics. – 2010. – Т.3, №3. – С. 58-67. – ISSN 1999-6691.

44 Кареев, А.Е. Влияние погрешностей координат установки датчиков пьезоантенны на точность локализации источников сигналов акустической эмиссии / А.Е. Кареев, Л.Н. Степанова, Е.С. Тенетилов // Дефектоскопия. – 2010. – №1. – С. 20 – 28. – ISSN 0130–3082.

45 Качанов, В. К. Особенности применения метода «фокусировки в точку» при ультразвуковой томографии изделий из сложноструктурных материалов / В. К. Качанов, И. В. Соколов, М. В. Туркин, Е. В. Шалимова, Д. В. Тимофеев, М. М. Конов // Дефектоскопия. – 2010. – №4. – С. 30 – 44. – ISSN 0130–3082.

46 Качанов, В. К. Пространственно-временные характеристики ультразвуковых широкополосных преобразователей / В. К. Качанов, И. В. Соколов, М. М. Конов, Д. В. Тимофеев, А. А. Синицын // Дефектоскопия. – 2010. – №10. – С. 11 – 25. – ISSN 0130–3082.

47 Качанов, В. К. Разработка ультразвукового широкополосного мозаичного низкочастотного пьезопреобразователя с ограниченной апертурой / В. К. Качанов , И. В. Соколов, М. М. Конов, Д. В. Тимофеев, А. А. Синицын // Дефектоскопия. – 2010. – №9. – С. 26 – 32. – ISSN 0130–3082.

48 Коновалов, С. И. Влияние демпфера на длительность акустического импульса, излучаемого многослойным преобразователем в твердую среду / С. И. Коновалов, А. Г. Кузьменко // Дефектоскопия. – 2005. – №7. – С. 39 – 45. – ISSN 0130–3082.

49 Коновалов, С. И. Влияние конструктивных параметров преобразователя на длительность акустического импульса, излучаемого в твердое тело / С. И. Коновалов, А. Г. Кузьменко // Дефектоскопия. – 2005. – №6. – С. 3 – 10. – ISSN 0130–3082.

50 Кузьменко, А. Г. О возможностях сокращения длительностей акустических импульсов, излучаемых пьезопластиной при использовании демпфера или электрической RL-цепи, при возбуждении пластины электрическими импульсами различной длительности / А. Г. Кузьменко, С. И. Коновалов // Дефектоскопия. – 2011. – №9. – С. 62 – 71. – ISSN 0130–3082.

51 Лапшин, Б. М. Особенности поиска утечек в трубопроводах тепловых сетей методом акустической эмиссии / Б. М. Лапшин, А.Л. Овчинников, А.С. Чекалин // Дефектоскопия. – 2011. – №10. – С. 81 – 91. – ISSN 0130–3082.

52 Ландау, Л. Д. Теоретическая физика. В 10-ти т. Т.VII. Теория упругости: Учеб. пособие. – 4-е изд., испр. и доп. / Л. Д. Ландау. Е. М. Лифшиц. – М.: Наука. Гл. ред. физ.- мат. лит., 1987. – 248 с.

53 Левитан, Л.Я. Ультразвуковой контроль прочностных характеристик стали 45 / Л.Я. Левитан, А.Н. Федорченко, А.В. Шарко // Дефектоскопия – 1976. - №3. – С. 129-130.

54 Марков, А. А. Программа трехмерного моделирования сигналов ультразвукового контроля изделий /А. А. Марков, В. В. Мосягин, М. В. Кескинов. //Дефектоскопия. – 2005. – №12. – С. 7 – 22. – ISSN 0130–3082.

55 Муравьев, В.В. Влияние условий нагружения на информативные параметры и спектр сигналов акустической эмиссии в образцах углеродистых сталей / В.В. Муравьев, М.В. Муравьев, С.А. Бехер // Дефектоскопия. – 2002. – № 7. – С. 10-20.

56 Муравьев, В.В. Исследование наплавленных поверхностей литых деталей тележек грузовых вагонов с использованием метода акустической эмиссии / В.В. Муравьев, А.Л. Бобров, Е.В. Бояркин, С.А. Бехер // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2008. – № 3 (31). – С. 42-47.

57 Муравьев, В.В. Оценка степени опасности дефектов при АЭ контроле металлических конструкций / В.В. Муравьев, Л.Н. Степанова, Е.Ю. Лебедев, А.Е. Кареев // Дефектоскопия. – 2002. – № 8. – С. 44-52.

58 Муравьев, В.В. Оценка степени опасности усталостных трещин при акустико-эмиссионном контроле литых деталей тележки грузового вагона / В.В. Муравьев, Л.Н. Степанова, А.Е. Кареев // Дефектоскопия. – 2003. – № 1. – С. 63.

59 Муравьев, В.В. Скорость звука и структура сталей и сплавов / В.В. Муравьев, Л.Б. Зуев, К.Л. Комаров – Новосибирск: Наука. – 1996. – 184 с.

60 Наседкин, А. В. Конечно-элементный расчет высокотемпературных преобразователей акустической эмиссии / А. В. Наседкин, В. М. Шихман, С. В. Захарова // Дефектоскопия. – 2011. – №7. – С. 49 – . – ISSN 0130–3082.

61 Наседкин, А. В. Применение конечно-элементных методов для расчета приемных систем акустико- эмиссионного контроля / А.В. Наседкин, В.М. Шихман, С.В. Захарова, И.В. Иванилов // Дефектоскопия. – 2006. – № 2. – С. 16-27. – ISSN 0130 – 3082.

62 Наседкин, В. А. Совершенствование приемных устройств и методик акустико-эмиссионного контроля объектов железнодорожного и авиационного транспорта на основе теоретического и экспериментального моделирования волновых процессов / В. А. Наседкин, В.М. Шихман, И.В. Иванилов // Техника, технологии и перспективные материалы: межвузовский сборник научных трудов. - М.; МГИУ. - 2004. - С. 251-256.

63 Неразрушающий контроль и диагностика: Справочник / В.В. Клюев. Ф.Р. Соснин, В. Н. Филинов и др.; под ред. В.В. Клюева. М.: Машиностроение, 1995. - 448 с.

64 Неразрушающий контроль. в 5 кн. Кн. 2. Акустические методы контроля: практ. пособие / И. Н. Ермолов, Н. П. Алешин, А. И. Потапов; под ред. В. В. Сухорукова. – М.: Высш. шк., 1991. – 283 с.: ил.

65 Неразрушающий контроль. Справочник в 7-ми томах под ред. чл.-корр. РАН В. В. Клюева. / Том 3. Ультразвуковой контроль. М.: «Машиностроение». – 2004. – 835 с.

66 Носов, В.В. Влияние неоднородности прочностного состояния на акустическую эмиссию конструкционных материалов / В.В. Носов, Г.С. Елъчанинов // Дефектоскопия. – 2011. – №12. – С. 11 – 12. – ISSN 0130–3082.

67 Огородникова, О. М. Компьютерная диагностика дефектов и механических напряжений в литых деталях // Дефектоскопия. – 2011. – №8. – С. 85 – 94. – ISSN 0130–3082.

68 Основы неразрушающего контроля методом акустической эмиссии: учебное пособие / С. А. Бехер, А. Л. Бобров; Сибирский гос. ун-т путей сообщ. (СГУПС). – Новосибирск, 2008. – С. 116.

69 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.

70 Пат. 2217741 Российская Федерация, МПК G01N29/14 Многоканальная акустико-эмиссионная система диагностики конструкций / Степанова Л.Н., Серьезнов А.Н., Круглов В.М., Муравьев В.В., Кабанов С.И., Лебедев Е.Ю., Ельцов А.Е.; заявитель и патентообладатель ФГУП СибНИА им. С.А. Чаплыгина. -№ 2001106785/28; заявл. 13.03.2001; опубл. 20.05.2003 – 6 с.:ил.

71 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.

72 ПБ 03-593-03 (Приказ Ростехнадзора от 13.01.2015 N 5). Правила организации и проведения акустико-эмиссионного контроля сосудов, аппаратов, котлов и технологических трубопроводов. – Утв. 09.06.2003.N77

73 РД 03-300-99. Руководящий документ Госгортехнадзора России. Требования к преобразователям акустической эмиссии, применяемым для контроля опасных производственных объектов. - Введ. 1999-10-01. - М.:ПИО ОБТ, 2002. - 25 с.

74 Ремезов, В.Б. Исследование эффективности возбуждения акустических колебаний в неферромагнитных материалах. Построение 3-Д диаграмм для наглядного представления распространения акустических колебаний, возбуждаемых двух проводным излучателем // Контроль. Диагностика. – 2009. – №3. – С. 44 – 47. – ISSN 0201-7032.

75 Ринкевич, А. Б. Вейвлетный анализ акустических полей и сигналов в ультразвуковой дефектоскопии / А. Б. Ринкевич, Д. В. Перов // Дефектоскопия. – 2005. – №2. – С. 43 – 54. – ISSN 0130–3082.

76 Сенько, В. И. Анализ причин повреждения и возможности продления срока службы боковых рам тележек грузовых вагонов / В. И. Сенько и др. // Вестник ГГТУ им. П. О. Сухого. - 2010. - №4. - с.13-18.

77 Сенюткин, П. А. Оценка характеристик пьезоэлектрических преобразователей / П. А. Сенюткин, Е. Ф. Чинейкина // Дефектоскопия. – 2005. – №1. – С. 20 – 28. – ISSN 0130–3082.

78 Степанова, Л. Н. Влияние температуры на характеристики пьезопреобразователей и погрешности локализации сигналов акустической эмиссии / Л. Н. Степанова, К. В. Канифадин, И. С. Рамазанов // Дефектоскопия. – 2010. – №5. – С. 79 – 88. – ISSN 0130–3082.

79 Степанова, Л.Н. Использование Вейвлет-фильтрации при локализации сигналов акустической эмиссии / Л.Н. Степанова, И.С. Рамазанов, С.И. Кабанов, А.Е. Кареев // Контроль. Диагностика. – 2007. – № 9. – С. 27-31.

80 Степанова, Л.Н. Исследование связи информативных параметров сигналов акустической эмиссии с процессом разрушения образцов с дефектами сварки / Л.Н. Степанова, В.Н. Чаплыгин, С.И. Кабанов, К.В. Канифадин, С.А. Катарушкин, Е.Ю. Лебедев // Дефектоскопия. – 2012. – № 6. – С. 11-21.

81 Степанова, Л.Н. Исследование образцов из материала боковых рам коробчатого сечения методом акустической эмиссии / Л.Н. Степанова, С.А. Бехер, Е.В. Бояркин, Н.А. Морева // Дефектоскопия. – 2013. – № 4. – С. 40-51.

82 Сыч, Т.В. Математическое моделирование акустических волн в пластине и в объемном теле сложной геометрической формы / Т.В. Сыч, С.И. Герасимов // В сборнике: Молодежь и современные информационные технологии, Сборник трудов XII Международной научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых. Национальный исследовательский Томский политехнический университет. - Томск, 2014. - С. 170-171.

83 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.

84 Сыч, Т.В. Моделирование распространения акустических волн методом конечных элементов / Т.В. Сыч, С.И. Герасимов, В.К. Кулешов // Инновации в неразрушающем контроле SibTest Сборник научных трудов I Всероссийской научно-практической конференции с международным участием. - 2011. - С. 233-235.

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

86 Сыч, Т.В. Моделирование распространения упругих волн в твердых телах методом конечных элементов / Т.В. Сыч, С.И. Герасимов // Интеллектуальный потенциал Сибири Материалы Межвузовской научной студенческой конференции: история и политология. - 2011. - С. 20.

87 Сыч, Т.В. Моделирование сигналов акустической эмиссии с использованием программного пакета COSMOS/M / Т.В. Сыч, С.И. Герасимов // Ресурс и диагностика материалов и конструкций V Российская научно-техническая конференция. - 2011. - С. 47.

88 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 ТГАСУ – 2012. №2. - С. 212-221.

89 Сыч, Т.В. Численное моделирование волновых процессов на границе раздела сред / Т.В. Сыч, С.И. Герасимов; под редакцией В.А. Клименова // Инновации в неразрушающем контроле Sib Test сборник научных трудов II Всероссийской с международным участием научно-практической конференции по Инновациям в неразрушающем контроле. - ТПУ,2013. - С.46-53.

90 Сыч, Т.В. Численное моделирование сигналов акустической эмиссии / Т.В. Сыч, С.И. Герасимов // Наука и молодежь XXI века материалы IX научно-технической конференции студентов и аспирантов. – Новосибирск, 2011. – С. 78-80.

91 Сыч, Т.В.Экспериментально-расчетное изучение распространения акустических волн от источника Су-Нильсена / Т.В. Сыч, С.И. Герасимов // Механика, ресурс и диагностика материалов и конструкций Тезисы VIII Российской научно-технической конференции. – 2014. - С. 112.

92 Теория упругости / С.П. Тимошенко, Дж. М. Гудьер. - М.: Наука, 1979. – 560 с.

93 Тырсин, А. Н. Дефектоскопия механических систем по отклику на гармоническое воздействие на основе моделей авторегрессии // Дефектоскопия. – 2005. – №2. – С. 72 – 78. – ISSN 0130–3082.

94 Хакимов, А. Г. О собственных колебаниях вала с моделью искусственного дефекта // Дефектоскопия. – 2010. – №6. – С. 93 – 98. – ISSN 0130–3082.

95 Чернышов, Е.А. Литейные дефекты. Причины образования. Способы предупреждения и исправления: учеб. пособие / Е.А. Чернышов, А.И. Евстигнеев, А.А. Евлампиев . – М.: Машиностроение, 2008. – 282 с.: ил.

96 Шевцов, С.Н. Решение задачи идентификации повреждений в упругом стержне на основе модели балки Тимошенко / С.Н. Шевцов, В.А. Акопьян, Е.В. Рожков // Дефектоскопия. – 2011. – №7. – С. 65 – 70. – ISSN 0130–3082.

97 Шевцова, М. С. Конечно-элементное моделирование эффективных свойств пористых пьезоэлектрических материалов и устройств на их основе: диссертация на соискание уч. ст. канд. техн. наук: 05.13.18 / Шевцова Мария Сергеевна. - Ростов-на-Дону, 2014. - С. 174.

98 Ширяев, А. М. Алгоритмы, критерии и расчетные формулы для визуализации источников акустической эмиссии // Дефектоскопия. – 2005. – №3. – С. 36 – 42. – ISSN 0130–3082.

99 Alleyne, D. A two-dimensional Fourier transform method for measurement of propagating multimode signals / D. Alleyne, P. Cawley // J Acoust Soc Am. - 1991. - Vol. 89, N. 3. - pp.1159-1168.

100 Bekher S. Regularities of acoustic emission in the freight car solebar materials // Journal of Physics: Conference Series. - 2016. - V. 671. - № 1. - p. 012005.

101 Bowyer, E.P. Experimental investigation of damping flexural vibrations in plates containing tapered indentations of power-law profile / E.P. Bowyer, D.J. O'Boy, V.V. Krylov, F. Gautier // Applied Acoustics. – 2013. - Volume 74(2013), Issue 4. - p. 553–560.

102 Carpinteri, A. Acoustic emission monitoring and numerical modeling of FRP delamination in RC beams with non-rectangular cross section / A. Carpinteri, G. Lacidogna, M. Paggi // Materials and Structures. - 2007. - pp. 553–566. - ISSN 40.

103 Carstensen, D. B. Modeling of gallium arsenide surface acoustic wave devices / D. B.Carstensen, T. A. Christensen, M. Willatzen, P. V. Santos // Electronic Journal «Technical Acoustics». - 2007. - V.19. - p. 1-13.

104 Cheng, A.C.H. Numerical Modeling of Elastic Wave Propagation in a Fluid-Filled Borehole / A.C.H. Cheng, J.O. Blanch // Communication in Computational Physics. - 2008. - Vol. 3, No. 1. - pp. 33-51.

105 Chowdhury, R. High dimensional model representation for stochastic finite element analysis / R. Chowdhury, S. Adhikari // Applied Mathematical Modelling. - V.34 (2010). - pp. 3917-3932.

106 Chukov, V.N. Oscillations of a statistical scattering in the Rayleigh limit and the Rayleigh law violation // Ultrasonics. – 2012. – Vol. 52, Issue 1. – pp. 5–11.

107 Cleveland, R.O. Modeling elastic wave propagation in kidney stones with application to shock wave lithotripsy / R.O. Cleveland, O.A. Sapozhnikov // J. Acoust. Soc. Am. - 2005. - V.118, No.4. - pp. 2667-2676.

108 Denia, F. D. Numerical approach for the acoustic connection of nonconforming meshes by transfer matrices / F. D. Denia, J. Martinez-Casas, L. Baeza, F. J. Fuenmayor // 18th International congress on sound and vibration. - Rio de janeiro Brazil, 10-14 luly 2011. - pp. 1-8.

109 Dhandole, S. On improving weakly coupled cavity models for vibro-acoustic predictions and design / S. Dhandole, S.V. Modak // Applied Acoustics. - 2010, N.71. - pp. 876-884.

110 Escolano, J. A comprehensive discrete-time computer modeling of acoustic Transmission Line loudspeakers / J. Escolano, B. Pueo, J. J. Lopez // Applied Acoustics. - 2011. - № 72. - pp. 742–753.

111 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.

112 Graff, K.F. Wave motion in elastic solids. - New York: Dover, 1991. - 664 p.

113 Hamstad, M. A. Acoustic emission signals generated by monopole (pencil-lead break) versus dipole sources: finite element modeling and experiments // J. Acoustic Emission. - 2007. - V.25 - pp. 92-106.

114 Hamstad, M. A. Acoustic emission source location in a thick steel plate by lamb modes // J. Acoustic Emission. - 2007. - V.25. - pp. 194-214.

115 Hirsekorn, M. Modelling and simulation of acoustic wave propagation in locally resonant sonic materials / M. Hirsekorn, P.P. Delsanto, N.K. Batra, P. Matic // Ultrasonics. Proceedings of Ultrasonics International 2003. – April 2004. – Volume 42, Issues 1-9. – p. 231-235.

116 Hora, P. Acoustic emission source modeling / P. Hora, O. Červená // Applied and Computational Mechanics .- 2010. - V.4. - pp. 25-36.

117 Hu, B. Numerical prediction of the interaction noise radiated from an axial fan / B. Hu, H. OuYang et al. // Applied Acoustics. – 2013. - Vol. 74, Issue 4. – pp. 544-552.

118 Huailai, Z. Multi-wave forward modeling of a reservoir and AVO analysis / Z. Huailai, L. Luming, L. Shengxian, W. Xiuling, B. Lifei // Mining Science and Technology. - 2010. - V.20 - pp. 0758-0764.

119 Juanjuan, L. Numerical simulation of scattering wave imaging in a goaf / L. Juanjuan, P. Dongming, L. Taiping, H. Mingshun, W. Linlin // Mining Science and Technology. - China, 2011. - V.21. - pp. 29-34.

120 Karmazin, A. Modelling of 3D Steady-State Oscillations of Anisotropic Multi-layered Structures Applying the Green's Functions // Adv. Theor. Appl. Mech. - 2010. - Vol. 3, no. 9. - pp. 425 - 450.

121 Kocur, G. K. Time reverse modeling of acoustic emissions in structural concrete: diss. eth no. 20368 / Georg Karl Kocur. – University of Wuppertal, 2012. – p.181.

122 Kostyukevych, A. 3D-3C Full-Wave Modeling in Anisotropic 2.5D Medium / A. Kostyukevych, N. Marmalevskyi, Y. Roganov, V. Tulchinsky // CSPG CSEG CWLS Convention. - Calgary, Canada, 2009. - pp.223-226.

123 Kumar, R. Propagation of plane waves and fundamental solution in the theories of thermoelastic diffusive materials with voids / R. Kumar, T. Kansal // Int. J. of Appl. Math. and Mech. - 2012. - № 8(13). - pp. 84-103.

124 Kundu, P. Identification of two simultaneous partial discharge sources in an oil-pressboard insulation system using acoustic emission techniques / P. Kundu, N.K. Kishore, A.K.Sinha // Applied Acoustics. – 2012. - Vol. 73, Issue 4. - pp. 395–401.

125 Liu, G. Transient Wave Propagation in a Circular Annulus Subjected To Impulse Excitation on Its Outer Surface / G. Liu, J. Qu // J. Acost. Soc. Am. - 1998. - Vol. 103, N.3. - pp. 1210-1220.

126 Markus, G. R. S. Investigation of pencil-lead breaks as acoustic emission sources // J. Acoustic Emission. - 2011. - V.29. - pp. 184-196.

127 Markus, G. R. S. Finite Element Modelling of Cracks as Acoustic Emission Sources / G. R. S. Markus, S. Richler // J Nondestruct Eval. - 2015. V. 34, - pp. 4-17.

128 Maruyama, M. The minimum measurement time for estimating L_{AeqT} of road traffic noise from the number of vehicle pass-bys / M. Maruyama, K. Kazuhiro, S.Toshio // Applied Acoustics. – 2013. - Volume 74(2013), Issue 3. - p. 317-324.

129 Matcharashvili, T. Investigation of Dynamics of Temporal Distribution of Acoustic Waves Caused by Stick-Slip Process / T. Matcharashvili, T. Chelidze, N. Zhukova, E. Mepharidze, A. Sborshchikov // Bulletin of the Eorgian National Academy of Sciences. - Vol. 4, no. 1, 2010. - pp. 53-54.

130 Meissner, M. Analytical and numerical study of acoustic intensity field in irregularly shaped room // Applied Acoustics. - 2013. - V. 74. - pp. 661-668.

131 Mingshun, H. Numerical simulation for recognition of coalfield fire areas by Rayleigh waves / Hu Mingshun, Pan Dongming, Chen Shenen, Dong Shouhua, Li Juanjuan // International Journal of Mining Science and Technology. - 2013. - V. 23, Issue 1. - pp. 27 -31.

132 Mostafapour, A. Analysis of leakage in high pressure pipe using acoustic emission method / A. Mostafapour, S. Davoudi // Applied Acoustics. – 2012. - Vol. 74, Issue 4. - pp. 335-342.

133 Padois, T. Numerical validation of shear flow corrections for beamforming acoustic source localization in open wind-tunnels / T. Padois, C. Prax, V. Valeau // Applied Acoustics. – 2013. - Vol. 74, Issue 4. - pp. 591-601.

134 Pang, S. Numerical simulation two phase flows of casting filling process using SOLA particle level set method / S. Pang, L. Chen, M. Zhang, Y. Yin, T. Chen, J. Zhou, D. Liao // Applied Mathematical Modelling. - 2010. - V.34. - pp. 4106-4122.

135 Ping, W. An application of back propagation neural network for the steel stress detection based on Barkhausen noise theory // NDT&Eternational. - 2013. - №55. - pp. 9-14.

136 Rama, K. Simulation of One-Port SAW Resonator using COMSOL Multiphysics / K. Rama, B. N. Harshal, R. Paily // Excerpt from the Proceedings of the COMSOL Users Conference 2006 Bangalore

137 Rui, W. Stress wave propagation in supporting bolts: A test for bolt support quality / W. Rui, X. Jinhai, L. Chong, Z. Baojing, M. Qianqian, W. Zhongliang // International Journal of Mining Science and Technology. - 2012. - V.22 - pp. 567-571.

138 Schubert, F. Negative Refraction and Focusing of Ultrasonic Lamb Waves in a Plate – How Far Are We From Practical NDE Applications? / F. Schubert, J. Schreiber // International Workshop of NDT Experts, NDTP2011 6th NDT in Progress 2011. - Prague, 10-12 Oct 2011.

139 Schubert, F. 3-D Ultrasonic Transducer Modeling Using the Elastodynamic Finite Integration Technique in Combination with Point-Source-Synthesis / F. Schubert, B. Lamek // Fraunhofer Institute for Nondestructive Testing (IZFP), Dresden Branch, Germany. - p.1-6.

140 Schubert, F. Numerical Modeling of Acoustic Emission Sources and Wave Propagation in Concrete // NDT.net. - September 2002. - Vol. 7, No.09. - p. 1-8.

141 Schubert, F. Numerical time-domain modeling of linear and nonlinear ultrasonic wave propagation using finite integration techniques – theory and applications // Ultrasonics. Proceedings of Ultrasonics International 2003.– April 2004. – Volume 42, Issues 1–9. - p. 221–229.

142 Shudong, L. Diagnosis of structural cracks using wavelet transform and neural networks // NDT&E International. - 2013. - №54. - pp. 9-18.

143 Shui, G. Evaluation of plastic damage for metallic materials under tensile load using nonlinear longitudinal waves / G.Shui, Y.-S. Wang, F. Gong // NDT&E International. - 2013. -V.55. - pp. 1-8.

144 Spies, M. Analytical methods for modeling of ultrasonic nondestructive testing of anisotropic media // Ultrasonics. Proceedings of Ultrasonics International 2003. – 2004. – Vol. 42, Issues 1–9. - pp. 213-219.

145 Tot, Y. Finite element analysis of static and dynamic fracture of brittle microcracking solids; Part 1: Formulation and Simple Numerical Examples / Y. Tot, S.N. Atluri // International Journal of Plasticity. - 1990. - Vol.6. - pp. 169-188.

146 Turchet, L. Investigating the amplitude of interactive footstep sounds and soundscape reproduction / L. Turchet, S. Stefania // Applied Acoustics. – 2013. - Vol. 74, Issue 4. - pp. 566-574.

147 Wang, P.W. Investigation of multi-layer sandwich beams through single degree-of-freedom transformation / P.W. Wang , W.W. Zhong, J.F. Hsu // Applied Acoustics. – 2013. - Vol. 74, Issue 4. - pp. 521-525.

148 Wang, W.Q. Strongly coupling of partitioned fluid–solid interaction solvers using reduced-order models / W.Q. Wang, Y. Yan // Applied Mathematical Modelling. - 2010. - V.34. - pp. 3817-3830.

149 Wotzka, D. Mathematical Model and Numerical Analysis of AE Wave Generated by Partial Discharges / D. Wotzka, T. Boczar, P. Fracz // Optical and Acoustical Methods in Science and Technology. - Vol. 120 (2011). - No. 4. - p. 767-771.

150 Zelenyak, A. M. Finite Element Modeling of Acoustic Emission Signal Propagation with Various Shaped Waveguides / A. M. Zelenyak, M. A. Hamstad, M. G. R. Sause // 31st Conference of the European Working Group on Acoustic emission (EWGAE) – We.1.A.4.

Приложение А

Патент на полезную модель «Акустическая головка»

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ

ПАТЕНТ

НА ПОЛЕЗНУЮ МОДЕЛЬ

№ 152495

АКУСТИЧЕСКАЯ ГОЛОВКА

Патентообладатель(ли): ***Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования "Сибирский государственный университет путей сообщения" (СГУПС) (RU)***

Автор(ы): ***см. на обороте***

Заявка № **2014150113**

Приоритет полезной модели **10 декабря 2014 г.**

Зарегистрировано в Государственном реестре полезных моделей Российской Федерации ***07 мая 2015 г.***

Срок действия патента истекает **10 декабря 2024 г.**

Врио руководителя Федеральной службы по интеллектуальной собственности

Л.Л. Кирий

Приложение Б

Патент на изобретение «Способ относительной калибровки преобразователей акустической эмиссии»

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ

ПАТЕНТ

НА ИЗОБРЕТЕНИЕ

№ 2554320

СПОСОБ ОТНОСИТЕЛЬНОЙ КАЛИБРОВКИ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ АКУСТИЧЕСКОЙ ЭМИССИИ

Патентообладатель(ли): *Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования "Сибирский государственный университет путей сообщения" (СГУПС) г. Новосибирск (RU)*

Автор(ы): *см. на обороте*

Заявка № 2014101589

Приоритет изобретения 20 января 2014 г.

Зарегистрировано в Государственном реестре изобретений Российской Федерации 27 мая 2015 г.

Срок действия патента истекает 20 января 2034 г.

Врио руководителя Федеральной службы по интеллектуальной собственности

Л.Л. Кирий

Приложение В

Акт об использовании результатов диссертационной работы

ВРК 1 ВАГОННАЯ РЕМОНТНАЯ КОМПАНИЯ-1

НОВОСИБИРСКОЕ ПРЕДСТАВИТЕЛЬСТВО

УТВЕРЖДАЮ
Заместитель директора
Новосибирского представительства АО
«ВРК-1»
_____ В. А. Синицын
М.П.
«29» апреля 2016 г.

АКТ ВНЕДРЕНИЯ
результатов диссертационной работы «Совершенствование технологии акустико-эмиссионного контроля на основе конечно-элементного анализа акустического тракта»
на соискание ученой степени кандидата технических наук
Сыч Татьяны Викторовны

Комиссия в составе: председатель ревизор по безопасности движения поездов Новосибирского представительства АО «ВРК-1» А. А. Больчанов, члены комиссии: мастер участка неразрушающего контроля вагонного ремонтного депо Омск-Сортировочный С. В. Вебер, мастер участка неразрушающего контроля вагонного ремонтного депо Ленинск-Кузнецкий М. А. Ильина составили настоящий акт о том, что результаты исследования закономерностей распространения акустико-эмиссионных сигналов в боковых рамах и надрессорных балок внедрены в технологию акустико-эмиссионного контроля литых деталей тележек грузовых вагонов при продлении срока службы и при проведении технического обслуживания ТО-3. Оптимизация схем установки преобразователей акустической эмиссии позволила уменьшить время подготовительных операций на 15%, за счет повышения чувствительностей каналов акустико-эмиссионной системы.

За 12 месяцев 2014 года в вагонных ремонтных депо Иланская, Инская, Ленинск-Кузнецкий, Нижнеудинск, Омск, Ружино, Тайшет, Улан-Удэ, Хабаровск, Чернышевск Новосибирского представительства АО «ВРК-1» с использованием усовершенствованных схем установки преобразователей акустической эмиссии проконтролировано 6721 боковых рам, что позволило сократить временные затраты на проведение контроля более чем на 200 часов.

Председатель комиссии
_____ А. А. Больчанов

Члены комиссии:
_____ С. В. Вебер
_____ М. А. Ильина

Акционерное общество
«Вагонная ремонтная компания – 1»
630003, г. Новосибирск, ул. Владимировская, 2/1
Тел.: +7 (383) 229-92-87, факс: +7 (383) 229-92-87