

На правах рукописи

**УЦЫН ГРИГОРИЙ ЕВГЕНЬЕВИЧ**

**СВЯЗЬ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ОТКЛИКА ДИЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ  
СРЕДЫ С ПАРАМЕТРАМИ ЕЕ НЕСТАЦИОНАРНОГО  
НАПРЯЖЕННО – ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ**

Специальность

01. 02. 04 – Механика деформируемого твердого тела

**Автореферат**

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата физико-математических наук

**Томск 2009**

Работа выполнена на кафедре механики графики и управления качеством факультета вычислительных систем ГОУ ВПО «Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники»

**Научный руководитель:** доктор технических наук, профессор  
Люкшин Борис Александрович

**Официальные оппоненты:** доктор физико-математических наук, ст.н.с.  
Герасимов Александр Владимирович  
кандидат физико-математических наук, доцент  
Алексеев Леонид Андреевич

**Ведущая организация:** Институт физики прочности и материаловедения СО РАН, ТНЦ

Защита диссертации состоится «25» сентября 2009 г.  
в « \_\_\_\_ » часов на заседании диссертационного совета Д 212.267.13 при  
Томском государственном университете по адресу 634050, г. Томск, пр.  
Ленина, 36.

С диссертацией можно ознакомиться в Научной библиотеке Томского государственного университета.

Автореферат разослан «25» августа 2009 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета Д 212.267.13  
доктор технических наук



Христенко Ю. Ф.

## Общая характеристика работы

### Актуальность проблемы

Диагностика усталостных разрушений и обнаружения внутренних дефектов является одной из важных проблем, во многом определяющих направления развития науки и техники. Решение задач, возникающих в связи с этим, становится возможным с созданием математического аппарата для описания напряженно-деформированного состояния (НДС) конструкций в условиях эксплуатации, с разработкой критериев разрушения составляющих эти конструкции материалов, накоплением и структуризацией знаний в области дефектоскопии, с постановкой и обработкой лабораторных и натуральных экспериментов, с созданием новых приборов диагностики. В основе существующих методов дефектоскопии лежит исследование физических свойств материалов и их изменения в состоянии предразрушения при воздействии на них рентгеновских, инфракрасных, ультрафиолетовых и гамма-лучей, радиоволн, ультразвуковых колебаний, магнитного и электростатического полей и др.

Вопросы диагностики горных выработок, конструкций из диэлектрических материалов исследовались экспериментально и теоретически многими авторами (Воробьев А. А., Герасимов А. В., Беспалько А. А., Макаров П. В., Романова В.А., Панин С. В., Люкшин Б. А., Яворович Л. В., Радченко А. В., Платова Т. М., Кукуджанов В. Н., Кондауров В. И., Немирович-Данченко М., Работнов Ю.И. и др.).

Физическими предпосылками к практической реализации проблем дефектоскопии являются экспериментальные данные. На основе этих данных и их обработки разрабатываются новые методы дефектоскопии.

При воздействии динамических нагрузок (вибрация, удар и т.п.) на конструкции из неметаллических материалов в их окрестности возникает электромагнитное поле за счет движения имеющихся на поверхности любого диэлектрика электростатических зарядов или так называемых процессов механоэлектрических преобразований на дефектах структуры. Вблизи дефектных областей изделия возникает электромагнитное поле, вызванное как изменением спектральных характеристик механических колебаний вблизи дефекта, так и дополнительной подзарядкой материала за счет трения противоположных берегов трещин или несоединенных элементов конструкций.

**Целью диссертационной работы** является исследование параметров напряженно-деформированного состояния диэлектрической дефектной или неоднородной конструкции (среды) при прохождении акустической волны и установление связи этих параметров с возникающим электромагнитным откликом.

### **Научная новизна и практическая значимость диссертационной работы.**

Научная новизна связана с определением деталей напряженно-деформированного состояния в окрестности дефекта диэлектрической среды методами вычислительной механики и установлением связи этих параметров с электромагнитным откликом.

Результаты исследований нашли применение в научных работах, проводимых в Электротехническом институте при Томском политехническом университете, а также в учебном процессе на кафедре механики, графики и управления качеством в Томском государственном университете систем управления и радиоэлектроники, на кафедре механики деформируемого твердого тела в Томском государственном университете.

**На защиту выносятся следующие положения и результаты:**

1. Результаты математического моделирования волновых процессов в диэлектрических неоднородных или дефектных образцах и их анализ.
2. Установленные связи параметров электромагнитных процессов, возникающих в образце при импульсном воздействии, с характером возникающего нестационарного напряженно-деформированного состояния в окрестности дефекта или границы раздела частей неоднородного образца.

**Обоснованность и достоверность** результатов, представленных в работе, подтверждается корректностью математических постановок задач, использованием апробированных и оттестированных вычислительных алгоритмов, сходимостью численных решений, использованием большого массива экспериментальных данных, физически объяснимым согласованием теоретических расчетных и экспериментально полученных результатов.

**Апробация работы.**

Материалы диссертации представлялись на конференциях:

- 1) Всероссийская научно-техническая конференция студентов и молодых ученых «Научная сессия ТУСУР – 2005», Томск, 2005 г.
- 2) Всероссийская научно-техническая конференция «Физика и химия высокоэнергетических систем», Томск, 2005
- 3) Всероссийская конференция «Демидовские чтения», Томск, 2006г.
- 4) Международная конференция по физической мезомеханике, компьютерному конструированию и разработке новых материалов, Томск, 2006 г.
- 5) VI Международная научная конференция «Радиационно - термические эффекты и процессы в неорганических материалах», Томск, 2008 г.

**Основные результаты диссертационной работы опубликованы** в 12 печатных работах, список которых приведен в конце автореферата.

**Структура и объем работы:** Диссертация состоит из Введения, четырех глав и Заключения, списка литературы, Приложений. Работа содержит 116 страниц, 49 рисунков. Список использованной литературы содержит 80 наименований.

**Автор выражает свою благодарность** своему научному руководителю Люкшину Б.А. Признательность автор выражает коллективу лаборатории ЭЛТИ ТПУ, в особенности Беспалько А.А. и Яворович Л.В. за предоставление экспериментальных данных и последующую совместную работу над ними.

## Основное содержание работы

**Во Введении** приведен обзор и анализ основных методов неразрушающего контроля (НК), классификация их по используемым физическим эффектам. Обосновывается актуальность темы диссертационной работы, определяются цели и задачи исследования. Формулируются результаты, составляющие научную и практическую значимость работы, положения, выносимые на защиту и новизна исследования. Перечислены преимущества и проблемы метода электромагнитной эмиссии (ЭМЭ).

**В первой главе** изложена физическая постановка задачи. Рассмотрена постановка задачи применительно к анализу НДС окрестности горной выработки как одного из предполагаемых применений разрабатываемого метода. Так как выработка в горном массиве всегда является концентратором напряжений, то в окрестности выработки важно получить оценки параметров НДС. Аналитически получить такие параметры не представляется возможным. Возникает необходимость проведения лабораторных исследований, которые моделировали бы процессы в горных породах при заданных параметрах среды. Результаты лабораторных исследований по получению электромагнитного отклика далее необходимо сопоставить с численными экспериментами, моделирующие волновые процессы.

Лабораторные исследования проводились в Томском политехническом университете в лаборатории электротехнического института. Целью лабораторных исследований является, с одной стороны, имитация полевых условий проведения эксперимента, при этом результат получается в виде спектров электромагнитного отклика на импульсное пьезоакустическое возбуждение. С другой стороны, лабораторные исследования позволяют создать наиболее удобные условия для регистрации и анализа параметров протекающих процессов.

Описана лабораторная установка для регистрации электромагнитного сигнала (ЭМС) при пьезоакустическом возбуждении.

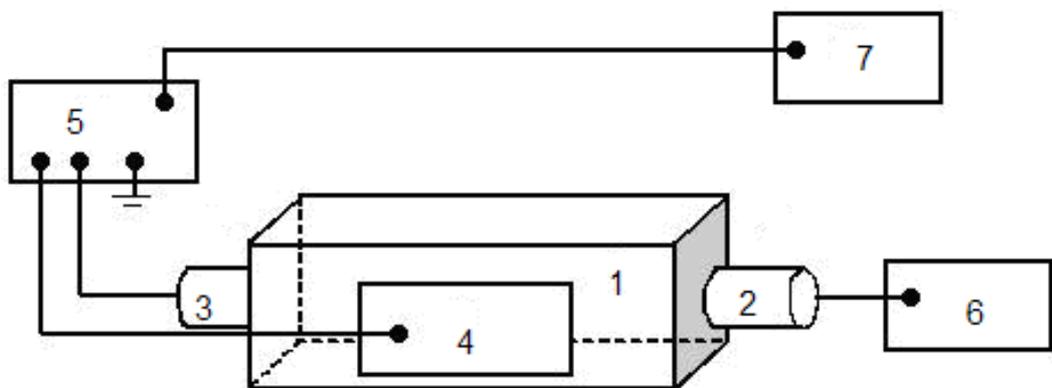


Рис. 1. Схема экспериментальной установки для регистрации ЭМС при пьезоакустическом возбуждении.

На рис. 1: 1 – исследуемый образец горной породы; 2 – пьезоакустический излучатель; 3 – пьезоакустический приемник; 4 – электромагнитный дифференциальный датчик; 5 – цифровой двухканальный осциллограф Tektronix TDS210; 6 – генератор высоковольтных импульсов для пьезоакустического излучателя (длительность вырабатываемых импульсов  $10^{-6}$ – $10^{-4}$ с, амплитуда импульсов 100 – 800 В); 7 – персональный компьютер.

Приведены амплитудно-частотные спектры ЭМС, полученные в ходе лабораторных исследований.

**Во второй главе** приведены уравнения, входящие в математическую постановку плоской задачи теории упругости. Она включает в себя уравнения движения, геометрические соотношения (соотношения Коши), физические соотношения, начальные и граничные условия. Граничные условия для свободной поверхности:

$$\sigma_n = \tau_n = 0.$$

Здесь  $\sigma_n$ ,  $\tau_n$  – нормальная и касательная составляющие компоненты вектора напряжений. Наличие трещин учитывается заданием на их берегах граничных условий для свободной границы. В случае неоднородностей в расчетной области на контактной границе записываются условия непрерывного контакта, когда выполняются равенства компонент векторов напряжений в виде:

$$\sigma_{n1} = \sigma_{n2}, \tau_{n1} = \tau_{n2},$$

а для перемещений на контактной границе используются условия:

$$u_1 = u_2 \text{ - нормальные смещения;}$$

$$v_1 = v_2 \text{ - касательные смещения.}$$

Импульсная нагрузка в виде нормальной компоненты вектора напряжений задается функция:

$$\sigma_n = X(x) \times T(t).$$

Первая из функций в правой части определяет закон изменения нагрузки по пространственной переменной, вторая – во времени.

В расчетах принимался закон изменения нагрузки вдоль оси  $x$  в виде так называемой колоколообразной функции. В плоской задаче эта функция принимается в виде

$$X(x) = e^{-\frac{(x-x_0)^2}{2d^2}}.$$

Величина  $d$  определяет форму “колокола”. Чем больше значение  $d$ , тем медленнее убывает нагрузка по мере удаления от центра ее приложения.

Закон изменения нагрузки во времени принимается в виде произведения затухающей экспоненты на первую половину синусоиды:

$$T(t) = e^{-\beta t} \sin \frac{2\pi t}{T},$$

Амплитудное значение импульса нагрузки  $A$  выбирается таким, чтобы в среде, по которой распространяется импульс, не возникало пластических деформаций.  $T$  — величина характеризующая длину первой полуволны синусоиды, условно называемой длиной импульса.

Приведены данные о свойствах исследуемой среды. В диссертационной работе моделируются процессы в образцах с прочностными свойствами цементного камня, кварца и включений со свойствами меди и дерева.

Для расчетов используется нецентральная разностная схема. Она является нецентральной в том смысле, что для аппроксимации пространственных производных используются левые и правые конечные разности, при этом не используются дополнительные сетки, смещенные относительно основной обычно на половину шага. Преимущества нецентральных схем по сравнению с большинством схем состоит в том, что упрощается логика программы, легко включаются неоднородные члены и непосредственно осуществляется обобщение на многомерные задачи. Использование линейных разностных схем с порядками аппроксимации выше первого приводит к появлению у решения не имеющих физического смысла осцилляций в окрестностях разрывов. Другие алгоритмы могут породить аналогичные эффекты у границ расчетной области.

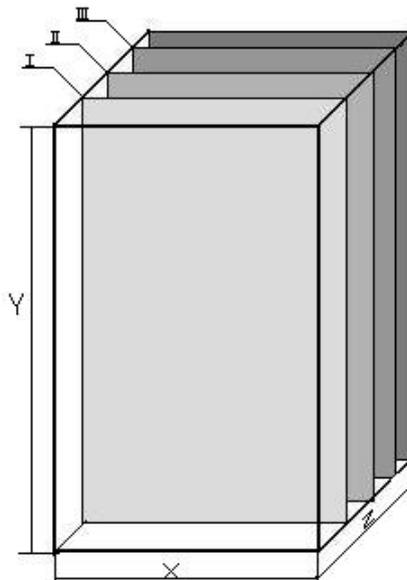


Рис.2. Расчетная область с выделенными сечениями

Приведены особенности схемы второго порядка с равными шагами на предикторе и корректоре, описана схема для пространственной задачи и для плоского случая. Выполнены тестирование и оценка устойчивости расчетной схемы.

Сопоставлением решений задач в двумерной и трехмерной постановках обоснована применимость использования двумерной постановки. Сопоставляются результаты анализа параметров НДС в сечениях при трехмерной постановке: два осевых сечения, перпендикулярных друг другу, и параметры НДС в симметричных относительно оси сечениях.

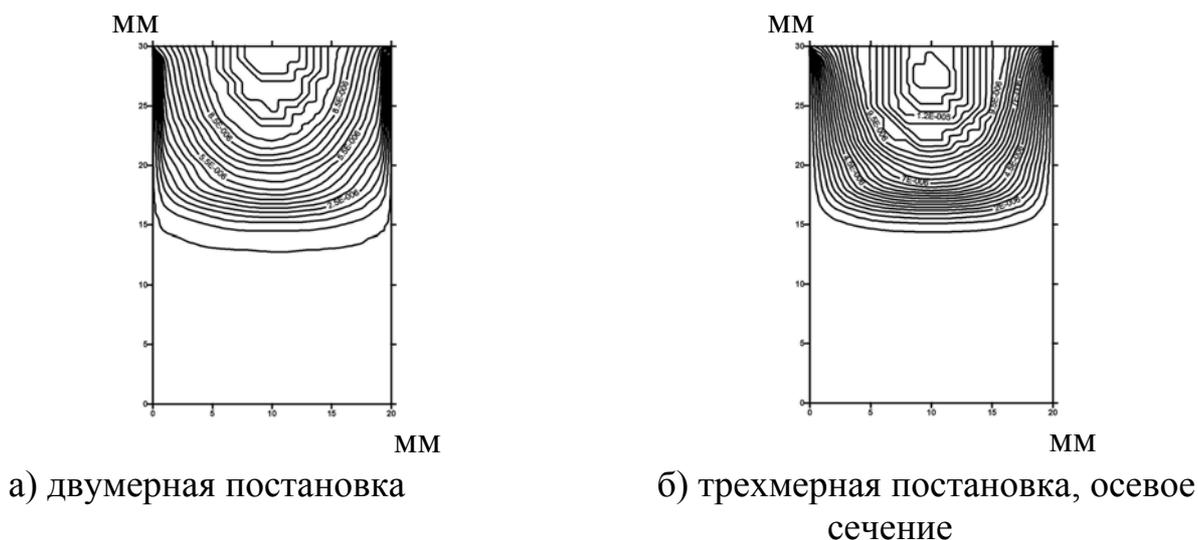


Рис. 3. Продольные перемещения в образце в момент времени 3 мкс после приложения нагрузки

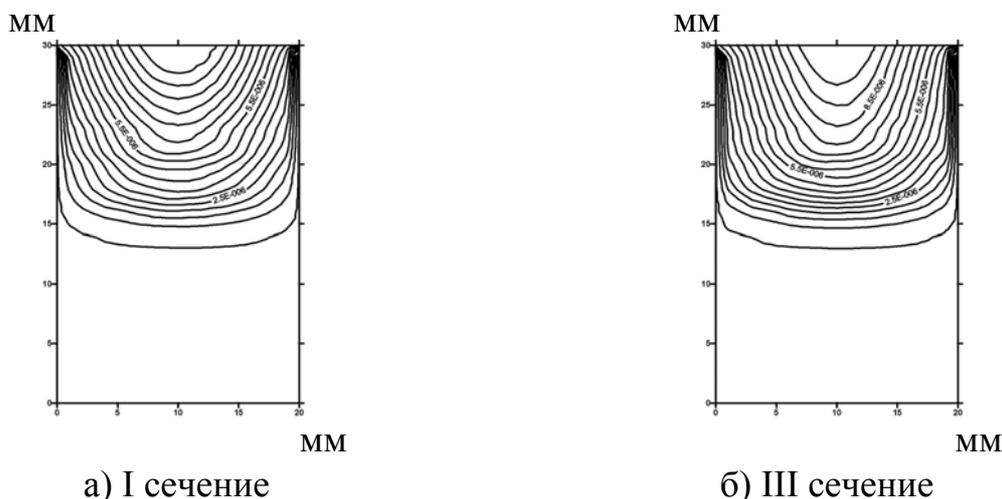


Рис. 4. Продольные перемещения в образце в момент времени 3 мкс после приложения нагрузки в симметричных относительно оси сечениях I и III (см. рис. 2).

Плоская расчетная схема имеет ряд преимуществ:

- упрощение расчетов, сокращение времени для вычислений;
- появляется возможность при прочих равных условиях использовать сетки с мелким шагом, что особенно важно при моделировании волновых процессов в неоднородных или дефектных средах, когда наличие концентраторов напряжений приводит к большим градиентам параметров НДС;
- упрощается обработка результатов.

**В третьей главе** показаны результаты расчетов, визуализированные с помощью специального пакета программ в виде поверхностей перемещений,

деформаций или напряжений. Как правило, по оси абсцисс ( $X$ ) и ординат ( $Y$ ) отложены координаты, по вертикальной оси ( $Z$ ) – вычисленная величина. Волновые процессы возникают в результате воздействия на образец короткого, быстро затухающего импульса, приложенного на боковой стороне.

В лабораторных исследованиях использовались образцы размером  $50 \times 50 \times 100 \text{ мм}^3$  (рис. 5).

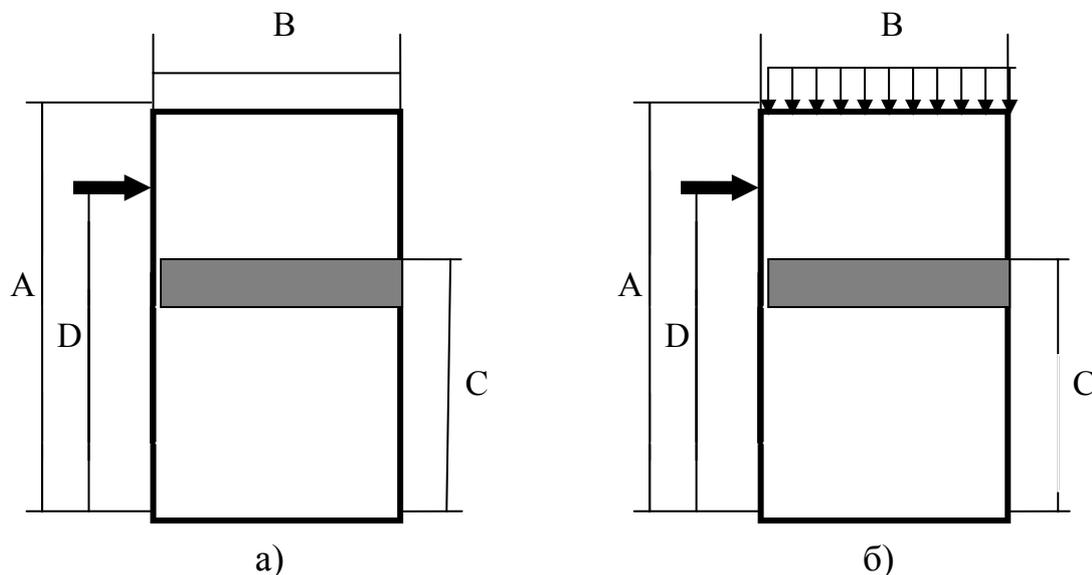


Рис. 5. Расчетная схема:

а) неподвижная фиксация образца;

б) предварительное поджатие образца с включением.

Импульсная нагрузка приложена на боковой поверхности

Материалом служил цементный камень, который является диэлектриком. Эксперимент реализовывался в двух вариантах. В первом случае верхняя и нижняя грани образца фиксировались без сколько-нибудь значительного поджатия (рис. 5, а). Во втором случае образец помещался между плитами пресса, которые создавали статическую нагрузку  $P=\text{const}$  вдоль наибольшей грани образца (рис. 5, б), имитирующую наличие напряжений в толще горной породы. В обоих случаях импульсная нагрузка прикладывалась к части боковой поверхности одной из вертикальных граней образца.

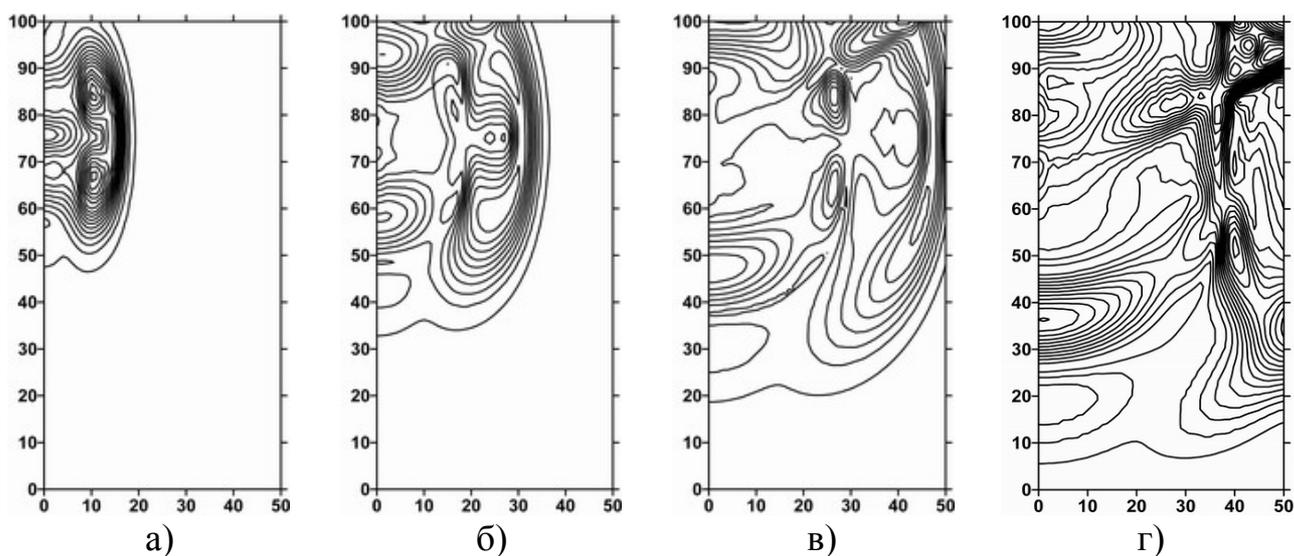


Рис. 6. Поля интенсивности деформаций в однородном образце, в начальном состоянии не подверженного действию внешней нагрузки, для последовательных моментов времени а) 5; б) 10; в) 15; г) 20 мкс

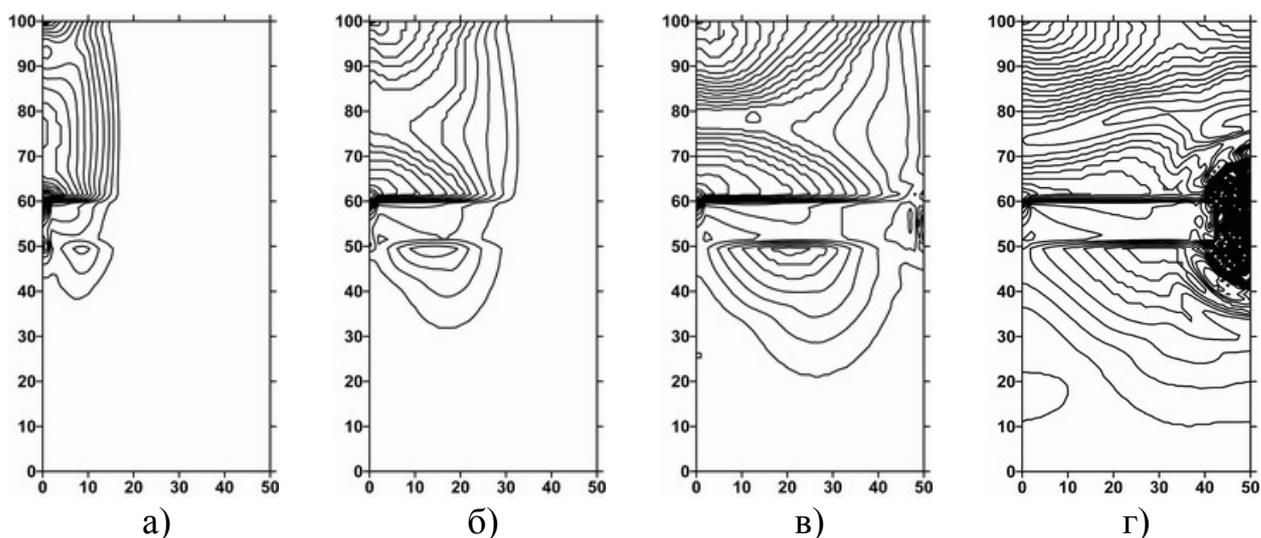


Рис. 7. Результаты для неоднородного образца, в начальном состоянии подверженного действию внешней нагрузки, для последовательных моментов времени а) 5; б) 10; в) 15; г) 20 мкс

Рассматривается влияние дефектов в виде включений заданных размеров и свойств на изменение параметров упругих волн при прохождении их по среде с такими включениями. Для случая, когда деформации превышают предел упругости, уравнения связи записываются в форме соотношений малых упругопластических деформаций А.А. Ильюшина. Интерес представляют оценки различия результатов, полученных в упругой и упругопластической постановке. Наибольшая разница наблюдается на границе вставки и основного материала.

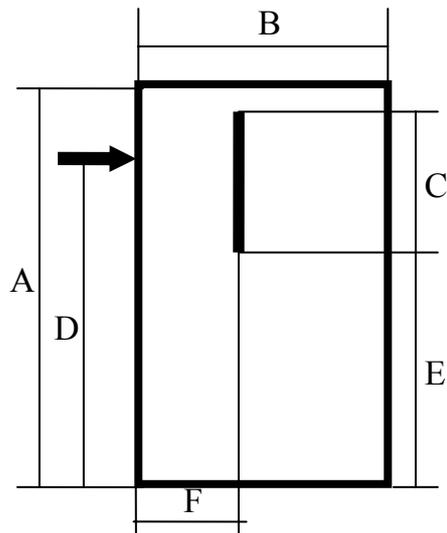


Рис. 8. Расчетная схема численного эксперимента для образца с трещиной

Исследовано влияние дефекта в виде трещины на процесс распространения упругого возмущения по расчетной области. На рис. 8 представлена область с размерами:  $A = 0.10$  м,  $B = 0.05$  м,  $C = 0.02$  м,  $D = 0.075$  м,  $E = 0.07$  м,  $F = 0.02$  м. Верхняя и нижняя граница зафиксированы, а боковые поверхности свободны, за исключением места приложения импульсной нагрузки, обозначенного на рис. 4 стрелкой.

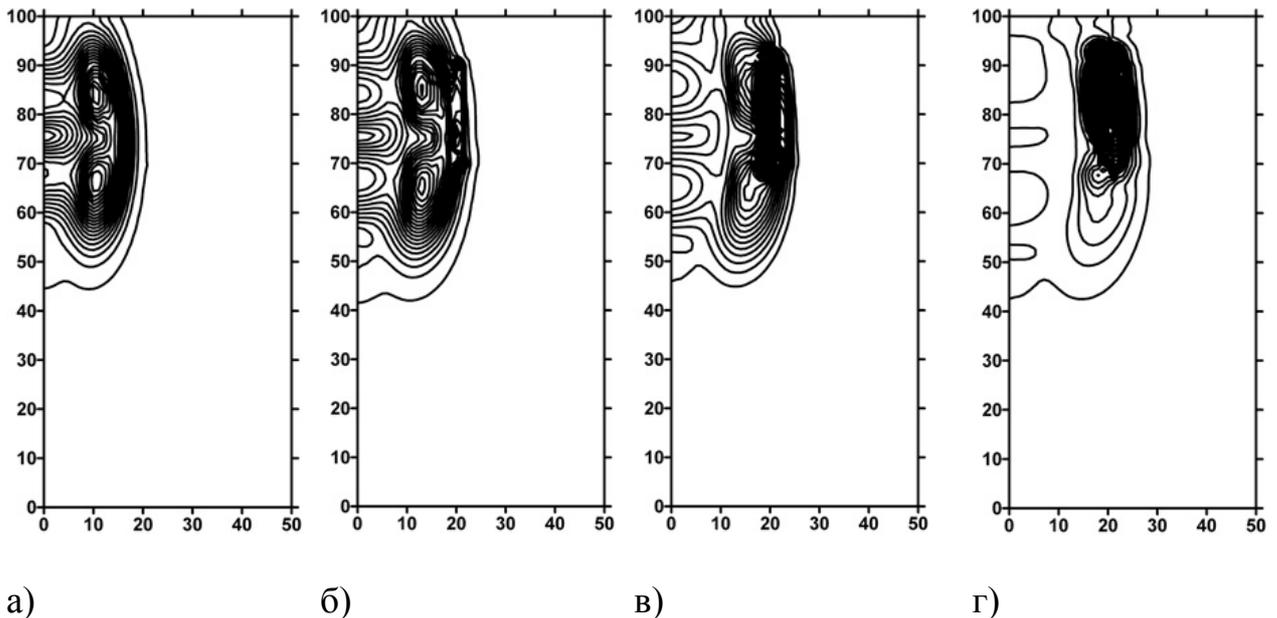


Рис. 9. Распространение интенсивности деформаций в образце с трещиной для моментов времени а) 5; б) 10; в) 15; г) 20 мкс

Из полученных результатов отчетливо виден характер влияния трещины на НДС образца при прохождении ее фронтом волны. Интенсивность деформации увеличивается в ее окрестности, а продольные перемещения гасятся на берегах трещины. В связи с этим возникает вопрос о характере влияния трещины на

волновой процесс при варьировании длины приложенного импульса. Для этого проведены следующие численные эксперименты.

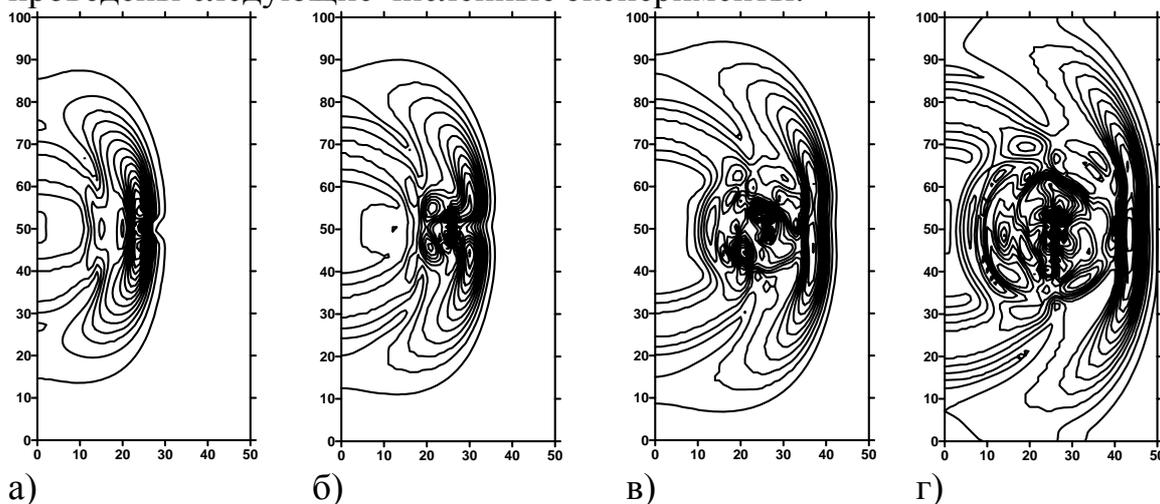


Рис. 10. Интенсивности напряжений в образце с вертикальной трещиной в моменты а) 8 мкс, б) 10 мкс, в) 12 мкс, г) 14 мкс после начала приложения нагрузки длиной 5 мкс

Лабораторный образец имеет те же геометрические размеры, что и в предыдущем эксперименте. В него вводится искусственная неоднородность в виде трещины, расположенной вдоль оси.

На верхней и нижней границе заданы условия жесткого закрепления, а на ненагруженных частях заданы граничные условия для свободной поверхности. Результаты такого численного эксперимента показаны на рис. 10 – 12.

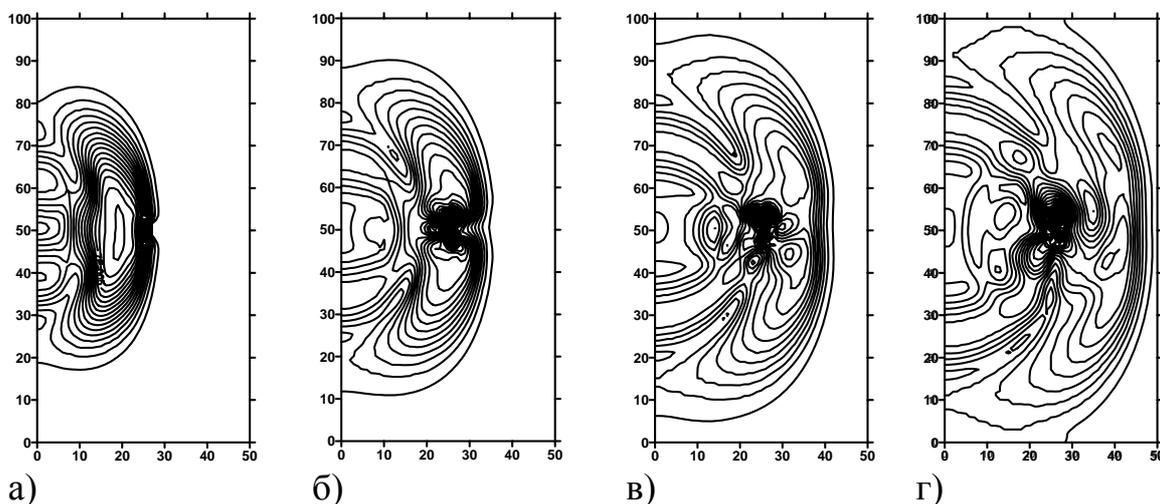


Рис. 11. Интенсивности напряжений в образце с вертикальной трещиной в моменты а) 8 мкс, б) 10 мкс, в) 12 мкс, г) 14 мкс после начала приложения нагрузки длиной 10 мкс

Чем длиннее приложенный импульс, тем меньше трещина искажает передний фронт волны.

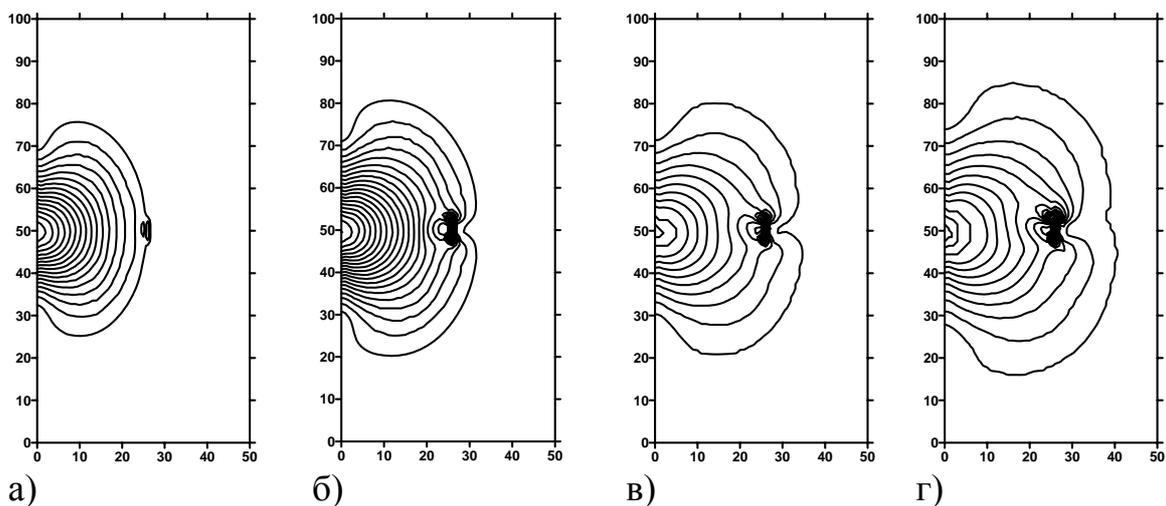


Рис. 12. Интенсивности напряжений в образце с вертикальной трещиной в моменты а) 8 мкс, б) 10 мкс, в) 12 мкс, г) 14 мкс после начала приложения нагрузки длиной 100 мкс

Проводились численные эксперименты по установлению связи прочностных характеристик сечения и параметров волнового процесса. Реальный образец кристаллического кварца, послуживший прототипом для создаваемой математической модели, имеет форму параллелепипеда с размерами (40×60×30) мм. К меньшей его грани прижат аналогичный образец кварца. Между этими параллелепипедами помещаются пластинки из различных материалов для имитации слоистых горных пород. В качестве вставки использовался полиметилметакрилат (ПММА) толщиной 3 мм, для которого характерна меньшая плотность и меньшая скорость распространения упругой волны по сравнению с соответствующими характеристиками кварца. В конкретном случае для расчетов использовали систему из двух одинаковых образцов кварца с прослойкой из ПММА, которая имела размеры (40×123×30) мм. Расчетная область имела форму прямоугольника, размеры которого соответствуют размерам продольного сечения собранной слоистой системы образцов (40×123) мм. Импульсная нагрузка прикладывалась к боковой грани одного из кварцевых образцов площадью (40×30) мм вдоль оси слоистой системы (по нормали к наибольшей поверхности вставки). Длина приложенного импульса 50 мкс.

На рис. 13 отображены результаты расчетов изменения напряжений для моментов времени: а – 6 мкс, б - 12 мкс. К этому времени упругое возмущение еще не успевает дойти до вставки, и процесс развивается точно так же, как и в случае однородного материала. Скорость распространения волны по образцу до вставки определяется упругими характеристиками кварца. Появление двух всплесков напряжений в зоне приложения нагрузки связано с тем, что колоколообразный импульс, описанный выше, в расчетах искусственно обрезался по ширине. В связи с этим его значения меняются скачком, что и приводит к появлению пиков напряжений. Далее на рис. 13 аналогичные распределения интенсивности напряжений приведены для более поздних моментов времени: в - 24 мкс, г - 27 мкс. В расчетный момент времени 15 мкс

возникают возмущения, вызванные выходом волны на границу вставки. При этом одна часть волны проходит через вставку дальше, а другая отражается от нее. При распространении волны в области до вставки возникает высокочастотный колебательный процесс. Это хорошо видно на рис. 13 по осциллирующим напряжениям в фиксированные моменты времени 24 и 28 мкс. Эти осцилляции полностью определяются характером приложенной нагрузки. В то же время за вставкой волновой процесс характеризуется как меньшей амплитудой, так и, что представляется более значимым, меньшими частотами. Вставка в виде слоя оргстекла выполняет функцию «фильтра», отсекающего высокочастотный спектр волнового процесса, проходящего во второй образец кварца модельной слоистой системы. Очевидно, что это связано с деформационно-прочностными характеристиками материала вставки. Более податливый материал выступает здесь в роли демпфирующего устройства, гасящего высокочастотные упругие колебания. В то же время в образце кварца модельной слоистой системы со стороны ввода импульса наблюдаются высокочастотные колебания, обусловленные процессами повторного отражения и наложения акустических возмущений.

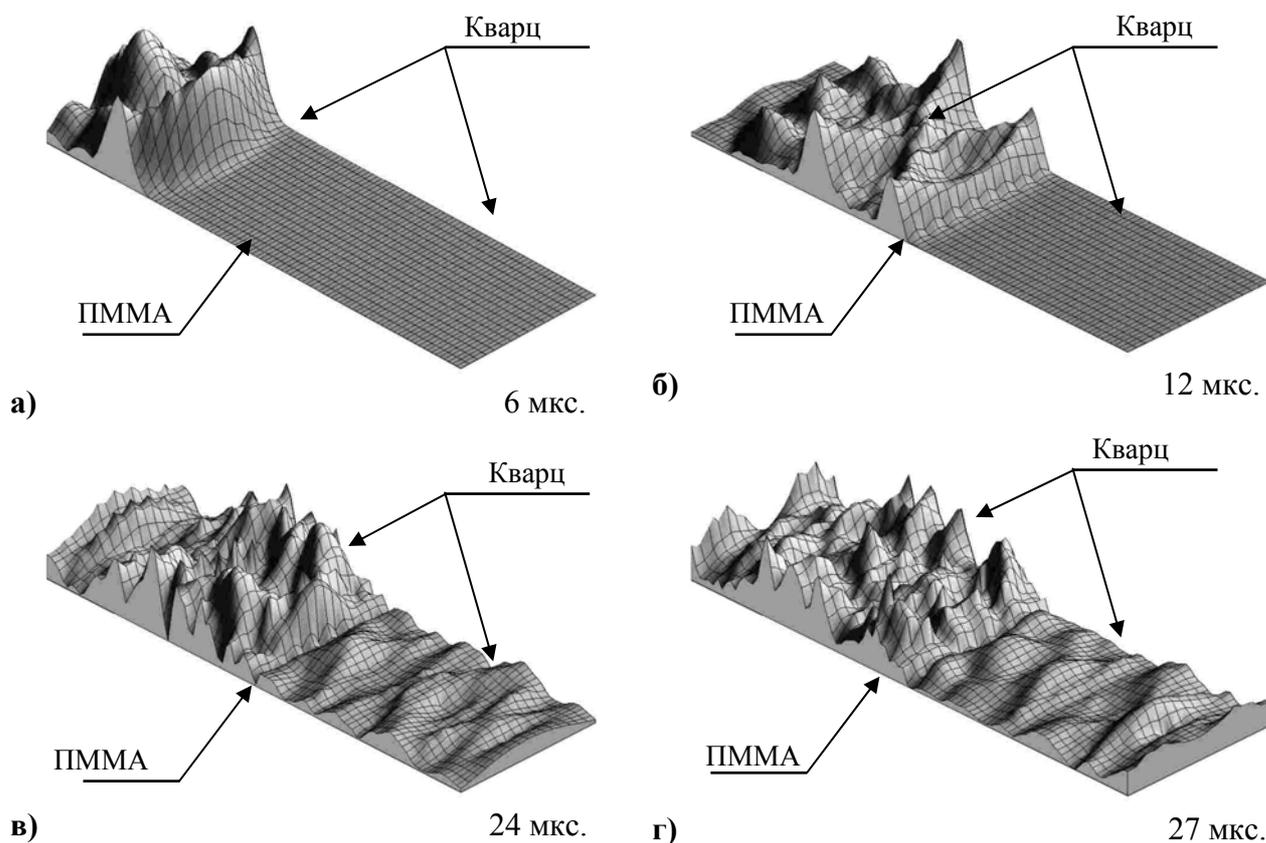


Рис.13. Распределение интенсивности напряжений в образце со вставкой в моменты времени: а – 6 мкс, б - 12 мкс, в -24 мкс, г - 27 мкс.

Вдоль поверхности (40×123) мм, по которой распространялась волна возмущений, вызванная импульсом нагрузки длиной 50 мкс. Экспериментально с помощью точечных бесконтактных датчиков были измерены электромагнитные сигналы, возникающие вследствие

механоэлектрических преобразований в модельной слоистой системе кварца и ПММА. Импульс вводился в образец с помощью пьезоакустического излучателя. На рис. 14 показаны изменения амплитуды аналогового электромагнитного сигнала вдоль поверхности модельной слоистой системы. Место введения акустического импульса соответствует началу координат рисунка. Видно, что амплитуда ЭМС уменьшается за вставкой, что согласуется с результатами расчетов интенсивностей напряжений в модельной слоистой системе, приведенных выше.

Экспериментальные исследования проводились специалистами Электротехнического института Томского политехнического университета Беспалько А.А., Яворович Л.В., Кузьминых Р.А.

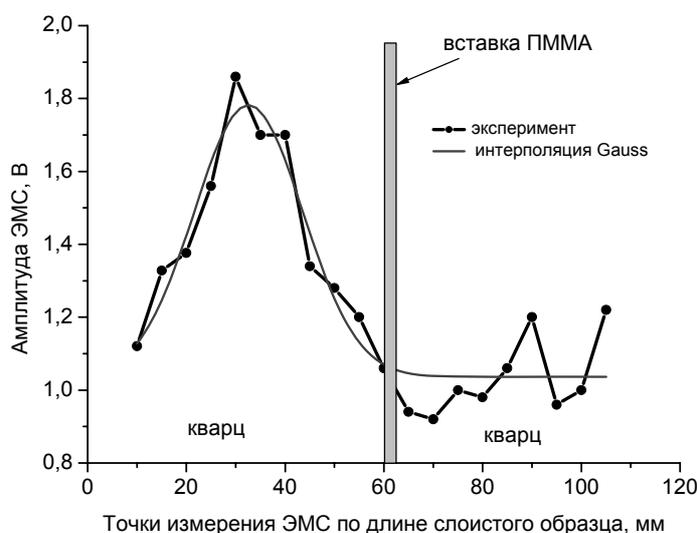


Рис.14. Изменения амплитуды электромагнитного сигнала по длине слоистого образца

На рис. 14 представлен график изменения амплитуды электромагнитного сигнала по длине слоистого образца, на котором точками показаны места установки датчиков и уровень амплитуды, замеренный этими датчиками.

На рис. 15 показаны изменения амплитудно-частотных характеристик электромагнитных сигналов слоистой системы со вставкой ПММА толщиной 2.3 мм. На рис. 15а приведен спектр ЭМС слоистой системы на отметке 15 мм, а на рис. 15б - за вставкой по ходу распространения акустического импульса на отметке 95 мм. Видно, что за вставкой резко изменяется соотношение между низкочастотной и высокочастотной частями спектра ЭМС. Такие же изменения характерны и для спектра акустического сигнала, полученного расчетным путем (рис. 13).

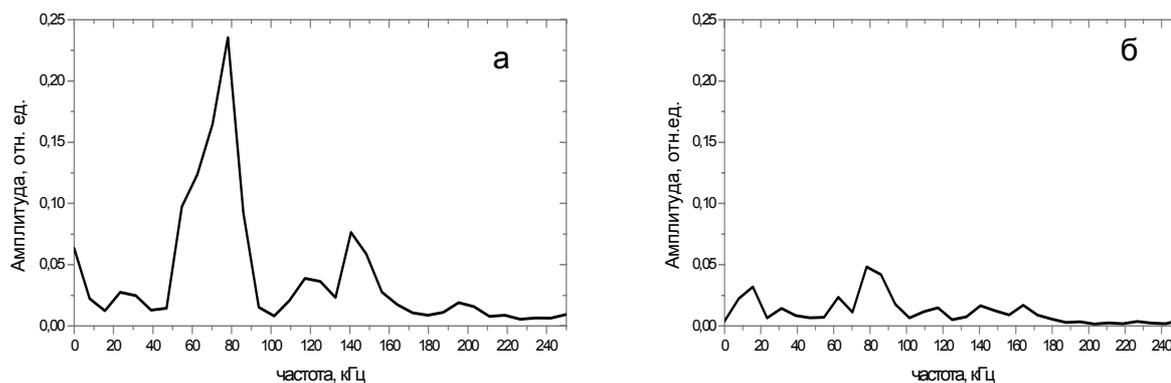


Рис. 15. Спектры электромагнитных сигналов слоистой системы образцов кварца со вставкой ПММА толщиной 2.3 мм: а - перед вставкой на расстоянии 15 мм от места введения акустического сигнала; б – за вставкой на расстоянии 95 мм.

**В четвертой главе** проведено сопоставление численного и лабораторного экспериментов для определения параметров НДС, изменение которых напрямую связано с изменением электромагнитного сигнала.

Для определения связи между электромагнитным сигналом и параметрами волнового процесса был проведен лабораторный эксперимент и затем математически смоделирован соответствующий волновой процесс. В ходе лабораторных работ были получены электромагнитные характеристики процессов при прохождении акустического сигнала по однородному кристаллу и по системе двух идентичных кристаллов. В последнем случае использовалась вставка между кристаллами, моделирующая наличие неоднородности в образце. В эксперименте исследовались образцы кристаллов искусственного кварца размером  $(60 \times 40 \times 30)$  мм<sup>3</sup>.

Во второй серии экспериментов, результаты которых представлены ниже, исследуемый образец состоял из двух кристаллов кварца и слоя-прокладки между ними из полиметилметакрилата (оргстекло) толщиной 4.3 мм. Помещенные между образцами пластины оргстекла порождают двойной электрический слой на плоскостях контакта кристалла и пластины.

На рис. 16 (а, б, в) приведены спектральные характеристики ЭМС, полученные при нагружении системы контактирующих образцов.

Датчик, установленный в месте контакта кристаллов, зарегистрировал ЭМС, в спектральных характеристиках которого наблюдаются частотные максимумы, характерные для ЭМС от одиночных образцов, и существенное увеличение амплитуды частотной полосы около 60 кГц на границе двух одинаковых кристаллов кварца, представляющего двойной электрический слой. Это обусловлено тем, что при прохождении акустического сигнала через границы контакта на каждой из контактирующих граней кристаллов возбуждается переменное электрическое поле. Суперпозиция этих полей приводит к повышению значения ЭМС, которое регистрируется. Этот эксперимент

объясняет механизм, по которому происходит возрастание амплитуды ЭМС на границах прожилков в природных образцах в натуральных условиях на контактах горных пород.

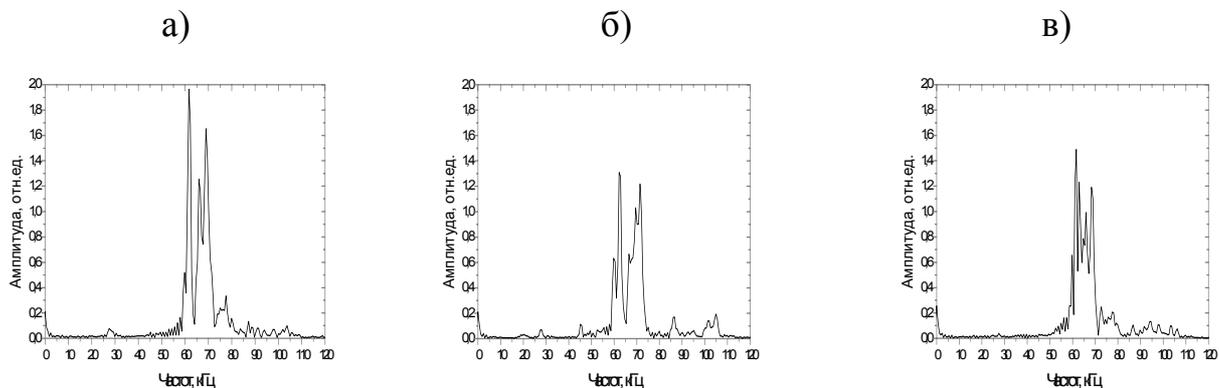


Рис. 16. Спектральные характеристики ЭМС, полученные при акустическом нагружении системы контактирующих образцов: а) первый, б) второй, в) третий датчик

Всего было проведено 20 измерений, что соответствует «сканированию» всей системы. Оценки, полученные с учетом скорости распространения акустической волны в системе, показали, что расстояние (шаг), с которым проводилась регистрация ЭМС, соответствовал времени прохождения акустической волны, равному 3 мкс.

Анализ полученных спектров показывает, что при изменении положения электромагнитного датчика изменяется амплитуда основных спектральных полос в районе 60 кГц и 70 кГц. В зависимости от расстояния происходит перераспределение электромагнитной энергии по частотам, но основные частоты остаются постоянными. Это означает, что основные частоты при акустическом возбуждении определяются размерами образца и скоростью прохождения акустического сигнала.

Рассмотрим различные интегральные характеристики на границе раздела фаз оргстекла и кварца. Таких границ будет две, расположенные на расстоянии 60 и 63 мм от основания системы (рис. 17).

Сигнал, воспринимаемый датчиком, связан с суперпозицией всех зарядов на поверхности раздела фаз. Следовательно, изменение электромагнитного поля напрямую зависит от движения границ раздела. При численном моделировании можно получить более двадцати механических характеристик (или их комбинаций) волнового процесса. Задача заключается в том, чтобы установить, какая из этих характеристик связана с ЭМС. Для этого был проведен анализ изменения интегральных величин характеристик НДС на контактных поверхностях кристалл – включение.

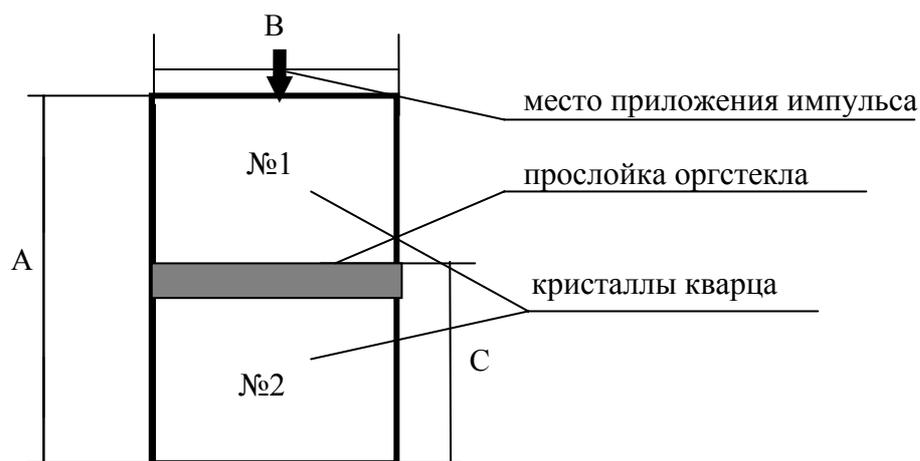
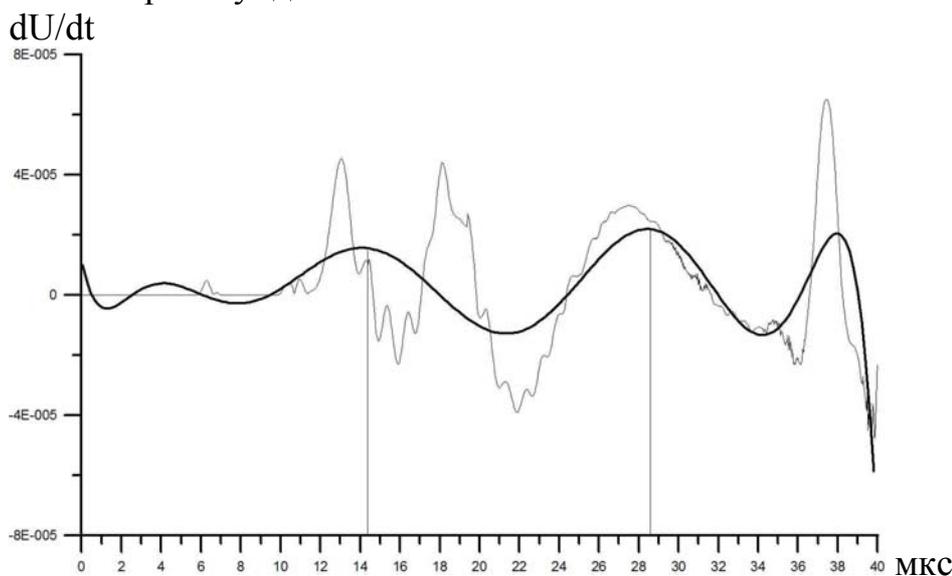


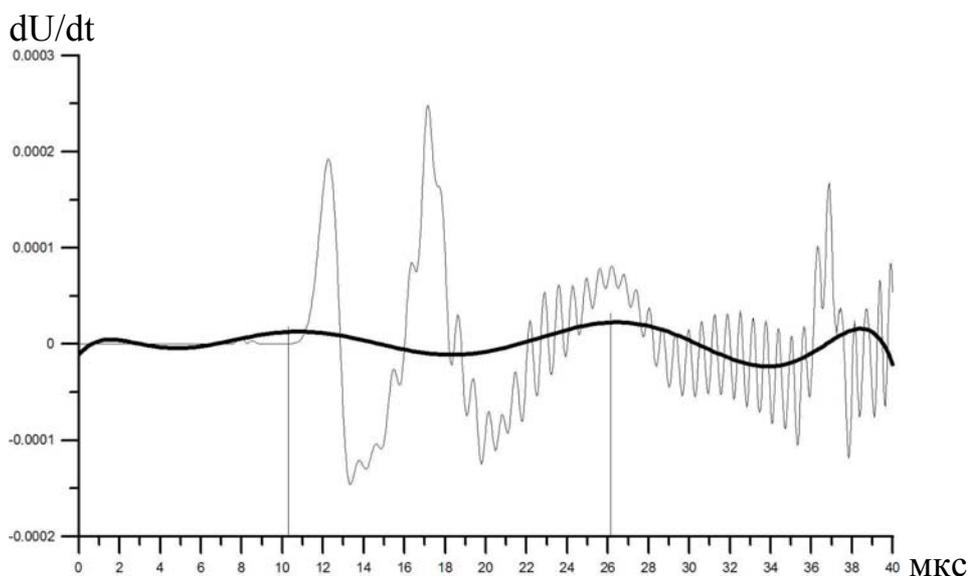
Рис. 17. Расчетная схема:  $A = 123$  мм,  $B = 40$  мм,  $C = 63$  мм, толщина прослойки оргстекла 3 мм.

Были рассмотрены различные параметры НДС, а так же их различные сочетания (суммы, разности), но все они либо не являлись периодическими функциями, либо имели период, не совпадающий с периодом спектра электромагнитного отклика. Некоторые из приведенных характеристик, такие, как продольная деформация или напряжения, имеют вид периодической функции, но при сглаживании полиномом их период больше периода измеренной величины.

Из всех полученных величин только сумма скоростей продольных смещений на границе раздела фаз имеет периодический характер. На рис. 18 представлен график изменения этой суммы: на вертикальной оси интегральная характеристика (скорость продольных смещений), а по горизонтальной оси время в микросекундах.



а)



б)

Рис. 18. Интегральные характеристики скоростей смещений на поверхностях раздела фаз кварцев и оргстекла.

Рис. 18 а) соответствует характеристикам границы раздела второго кварца и оргстекла на расстоянии 60 мм от нижнего края системы, а б) соответствует характеристикам границы раздела первого кварца и оргстекла на расстоянии 63 мм. Тонкой чертой показан результат численного моделирования, а жирной чертой – тот же результат, сглаженный полиномиальной функцией вида:

$$Y = a_0 + a_1 T^1 + a_2 T^2 + \dots + a_n T^n.$$

Вертикальными линиями выделены периодичные участки. На рис. 18 а) интервал периодичности примерно равен 14 мкс, что соответствует частоте 70 кГц, а на рис. б) интервал равен 16 мкс, что соответствует частоте около 60 кГц.

**В Заключение** сформулированы следующие результаты:

1. Приложение предварительной сжимающей нагрузки практически не влияет на процесс распространения упругих возмущений по образцу. Основные черты процесса полностью повторяются. Отсюда следует, что полученные в лаборатории результаты исследований можно применять при исследовании реальных процессов.

2. На основе полученных из расчетов полей распределения параметров НДС, в частности, интенсивностей напряжений в разные моменты времени, можно судить о геометрии и положении компактного включения в образце.

3. Появление эффекта отражения свидетельствует о наличии неоднородности, а интенсивность, с которой происходит отражение, напрямую связана с размером дефекта. Чем больше длина приложенного импульса по сравнению с размерами неоднородности, тем меньшее влияние оказывает наличие неоднородности на волновой процесс – варьируя длину приложенного

импульса, можно не только обнаружить дефект, но и установить его размеры. Следовательно, чтобы обнаружить более мелкие дефекты, нужно использовать более короткие импульсы.

4. Включения из более мягкого, чем основной массив, материала, влияют на проходящий по среде акустический сигнал как «фильтр», отсекая высокочастотный спектр волнового процесса.

5. Сопоставление данных эксперимента и расчетов показывает, что связь скорости смещения границ раздела в неоднородном образце из диэлектрического материала с параметрами электромагнитного отклика устанавливается достаточно уверенно.

Основные результаты диссертации опубликованы в следующих работах:

1. Беспалько А. А., Люкшин Б. А., Люкшин П. А., Матолыгина Н. Ю., Уцын Г. Е. Исследование волновых процессов в лабораторных образцах из диэлектрических материалов // Фундаментальные и прикладные проблемы современной механики. Доклады IV Всероссийской научной конференции. Томск: изд-во ун-та, 2004, с. 174-175.

2. Уцын Г. Е. Упругие волны в лабораторных образцах из диэлектрических материалов // Наука. Технологии. Инновации., Новосибирск: Изд-во НГТУ, Ч 1., 2004, с. 135 - 136.

3. Беспалько А. А., Люкшин Б. А., Матолыгина Н. Ю., Фурса Т. В., Уцын Г. Е. Моделирование волновых процессов в диэлектрических лабораторных образцах // Вестник ТПУ №7, 2005, Томск: изд-во ТПУ, с. 13 – 18.

4. Беспалько А. А., Матолыгина Н. Ю., Уцын Г. Е. Анализ напряженно-деформированного состояния в окрестности выработки в массиве горных пород // Физическая мезомеханика т. 8, № 4, 2005, с. 83-88.

5. Уцын Г. Е. Влияние включений на волновые процессы в образцах из диэлектрических материалов // Материалы IX всерос. научно-техническая конф. «Физика и химия высокоэнергетических систем», 2005.

6. Уцын Г. Е. Учет пластичности при анализе распространения волн в образце // Материалы «Всерос. научно-технической конф. студентов и молодых ученых» в рамках «Научной сессии ТУСУР – 2005», с. 216 – 219.

7. Уцын Г. Е. Моделирование волнового процесса в диэлектрическом образце с включением в виде трещины // Физ. и хим. наноматериалов: Сборник матер. «Межд. школы-конференции молодых ученых.» Изд. Томского государственного университета, 2005, с. 465 – 468.

8. Беспалько А. А., Бочкарева С. А., Уцын Г. Е. Диагностика неоднородностей в диэлектриках на основе исследования волновых процессов и порождаемых ими явлений электромагнитной эмиссии // Тезисы докладов международной конференции по физической мезомеханике, компьютерному конструированию и разработке новых материалов. Россия, Томск: ИФПМ СО РАН, 2006, с. 337.

9. Уцын Г. Е. Явление дифракции упругих волн в окрестности трещины в диэлектрическом образце // Мат. 3-й Всероссийской конференции молодых

ученых. Изд-во Института оптики атмосферы СО РАН, 2006, с. 640 – 642.

10. Беспалько А.А., Кузьминых К.А, Люкшин Б.А., Яворович Л.В., Уцын Г.Е. Экспериментальное и теоретическое исследование электромагнитной эмиссии в неоднородных диэлектрических образцах // Известия высших учебных заведений, Физика, 2007, т. 50, № 2, с. 16-22.

11. Беспалько А.А., Люкшин Б.А., Яворович Л.В. Уцын Г.Е. Связь эволюции упругих волн в неоднородной среде с параметрами электромагнитных сигналов // Труды VI Международной научной конференции «Радиационно - термические эффекты и процессы в неорганических материалах». Томск, 2008 г. , с. 1040.

12. Беспалько А.А., Люкшин Б.А., Яворович Л.В. Уцын Г.Е. Связь эволюции упругих волн в неоднородной среде с параметрами электромагнитных сигналов // Акустический журнал, 2008 г.