

**На правах рукописи**

**Ненарокомов Кирилл Алексеевич**

**РАЗРАБОТКА МЕТОДОВ ДЕФЕКТОСКОПИИ ТЕПЛОВОЙ ЗАЩИТЫ  
НАДУВНЫХ ТОРМОЗНЫХ УСТРОЙСТВ СПУСКАЕМЫХ  
КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ**

Специальность

05.07.03 – Прочность и тепловые режимы летальных аппаратов

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание ученой степени

кандидата технических наук

Москва - 2016

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)».

Научный руководитель: член-корреспондент РАН,  
доктор технических наук, профессор  
**Алифанов Олег Михайлович**

Официальные оппоненты: **Алексеев Алексей Кириллович**  
доктор физико-математических наук,  
Публичное акционерное общество «Ракетно-  
космическая корпорация «Энергия»  
имени С.П. Королёва», главный научный  
сотрудник отдела аэрогазодинамики

**Цысарь Сергей Алексеевич**  
кандидат физико-математических наук,  
Федеральное государственное бюджетное  
образовательное учреждение высшего  
образования «Московский государственный  
университет имени М.В.Ломоносова»,  
старший научный сотрудник кафедры  
фотоники и физики микроволн физического  
факультета

**Ведущая организация:** Федеральное государственное унитарное  
предприятие «Научно - производственное  
объединение имени С.А. Лавочкина»

Защита состоится «26» января 2017г. в \_\_\_\_ часов на заседании диссертационного совета Д 212.125.10, созданного на базе федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)», по адресу: 125993 Москва, А-80, ГСП-3, Волоколамское шоссе, д.4.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)» <http://www.mai.ru/events/defence/>.

Автореферат разослан «23» декабря 2016 г.

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

Денискина А.Р.

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

### Актуальность работы

Дефектоскопия материалов и конструкций всегда была и остаётся одним из важнейших вопросов производства и испытаний ракетно-космической техники. Одним из определяющих факторов при разработке и внедрении новых методик является стоимость проекта и оборудования. В связи с этим большое внимание уделяется созданию бесконтактных дистанционных методов неразрушающего контроля, которые по стоимости и эффективности могли бы стать альтернативой используемым технологиям. В последнее время наблюдается заметный рост числа публикаций, посвящённых исследованию нелинейности неоднородных сред, а также сред с дефектами. Такие среды обладают большой структурной нелинейностью, которая связана с наличием дефектов.

Общая тенденция развития космической техники связана с увеличением теплового нагружения различных систем, с необходимостью повышать их надёжность и ресурс и одновременно снижать материалоемкость. В последние годы как в РФ, так и в ЕС проявляется значительный интерес к исследованиям в обеспечение разработки космических спускаемых аппаратов (СА) с надувными аэродинамическими экранами. Как известно, СА подвергаются воздействию значительных силовых и тепловых нагрузок. Компромиссом между потребностью снижения уровня силовых и тепловых нагрузок на СА за счёт увеличения его поперечного размера и ограниченностью поперечного сечения ракеты носителя могут служить тормозные экраны раскрываемой конструкции. В связи со спецификой эксплуатации подобных надувных конструкций, а именно, первоначально надувная оболочка находится в сложенном состоянии во время подготовки СА к полету, в период старта и орбитального полета, впоследствии она надувается и разворачивается в рабочее положение, возникает необходимость контроля состояния конструкции теплозащиты к моменту ее функционирования.

В большинстве практических случаев прямая дефектоскопия элементов конструкций (особенно сложного состава) является невозможной. Единственным путем, позволяющим преодолеть эти сложности, являются непрямые измерения. Математически подобный подход обычно формулируется как решение обратной задачи: по измерениям состояния системы (например, акустического давления, как в настоящей работе) определить механические характеристики анализируемой системы, связанные с дефектами материалов. Нарушение причинно-следственных связей в постановке таких задач приводит к их некорректности в математическом смысле (т.е. отсутствию существования, единственности и устойчивости решения). Поэтому для решения подобных задач разрабатываются специальные методы, обычно называемые регуляризирующими.

Методы обратных задач дают возможность исследовать сложные

нестационарные нелинейные волновые процессы в элементах конструкции, обладают достаточно высокой информативностью и позволяют, в конечном итоге, более обоснованно принимать проектные и технологические решения. Поэтому в настоящее время в экспериментальной отработке СА методы исследований, основывающиеся на принципах обратных задач механики, находят всё более широкое применение. Основываясь на фундаментальных принципах теории некорректных задач математической физики, разработанных академиком А.Н.Тихоновым и его научной школой, большие успехи в разработке методов, алгоритмов и практическом использовании методов обратных задач теплообмена были достигнуты О.М. Алифановым, А.К. Алексеевым, Е.А. Артюхиным, В.Н. Елисеевым, И.С.Кабанихиным, Л.А. Коздобой, Ю.М. Мацевитым, Ю.В. Полежаевым, С.В. Резником, В.М. Юдиным, А.Г.Яголой, J.V. Beck, G. Chaven, Y. Jarny. Обратные задачи механики относятся к одному из динамично развивающихся разделов современной науки, имеющему многочисленные и разнообразные приложения в технике.

Подходы к параметрической идентификации коэффициентов математических моделей, базирующиеся на методах решения некорректных задач широко анализировались в нашей стране, а также в других странах и показали свою эффективность при разработках и исследованиях в космической, авиационной, автомобильной отраслях техники, металлургии, энергетике и т.д. Разрабатываемая новая система дефектоскопии материалов для гибких теплозащитных покрытий является комбинацией достаточно точных измерений состояния объекта (акустического давления при нагружении) и корректной математической обработки экспериментальных данных на основе теории обратных задач.

Изложенное выше делает задачу разработки метода дефектоскопии элементов надувных конструкций на базе обратных задач нелинейной акустики, как одного из методов ускоренных испытаний для повышения ресурса и долговечности СА, актуальной.

### **Цель работы**

Целью работы является создание методов и алгоритмов для дефектоскопии элементов конструкции надувных оболочек тормозных экранов СА, основанных на параметрической идентификации математической модели распространения продольных волн в упругой среде.

### **Задачи исследования**

1. Анализ возможных скрытых дефектов эластичных элементов конструкций и существующих методов и средств их обнаружения.
2. Анализ существующих математических моделей распространения продольных волн в сплошной среде с целью выбора обобщенной математической модели, удовлетворяющей инженерным требованиям для решения поставленной задачи.
3. Разработка алгоритма решения обратной задачи параметрической идентификации математической модели распространения продольных волн в

сплошной среде с целью обнаружения структурных неоднородностей.

4. Разработка численного метода для реализации параметрической идентификации математической модели распространения продольных волн в сплошной среде.

5. Исследование эффективности разработанного алгоритма, в том числе устойчивости к погрешностям исходных данных, путем вычислительных экспериментов.

6. Разработка прототипа экспериментальной установки, реализующей предложенный метод дефектоскопии.

7. Апробация разработанного метода с использованием образцов существующих материалов гибкой тепловой защиты СА.

#### **Методы исследования**

При решении поставленных задач использовались метод итерационной регуляризации, градиентный метод минимизации первого порядка, метод конечных разностей. Большинство элементов разработанного алгоритма реализовано на базе уже имеющегося программного обеспечения, написанного на языке FORTRAN, которое было переработано с учетом поставленной цели. Также для разработки прототипа экспериментальной установки использовался существующий опыт проведения акустических исследований.

#### **Научная новизна**

- разработаны методы и алгоритмы для решения задачи параметрической идентификации нелинейной обобщенной математической модели распространения продольных волн в среде с целью обнаружения скрытых дефектов;
- разработан экспериментальный способ дефектоскопии оболочки надувного тормозного экрана СА на основании измерения акустического давления;
- определены принципиальные возможности выявления геометрических параметров дефектов элементов конструкции по значению коэффициента нелинейности в математической модели распространения продольных волн.

#### **Практическая ценность**

Практической ценностью работы является:

- создание прототипа экспериментальной установки, реализующей разработанный в работе метод дефектоскопии, который может использоваться для создания промышленных установок неразрушающего контроля различных систем и агрегатов;
- разработка прикладного программного обеспечения, используемого для определения широкого спектра различных коэффициентов (характеристик) нелинейных математических моделей распространения продольных волн в материалах и элементах конструкций.

Диссертация является результатом исследований, проводимых на Аэрокосмическом факультете МАИ в рамках проекта № 834, выполняемого при финансовой поддержке Министерства образования и науки РФ в рамках базовой части государственного задания в сфере научной деятельности.

**Достоверность результатов**, полученных в работе, основывается на корректности математических моделей, строгости используемых математических решений, оценках их сходимости и подтверждается результатами численного моделирования и экспериментальных исследований образцов.

#### **Апробация работы и публикации**

Основные научные результаты работы докладывались на научно-технических конференциях. В частности, на 19 сессии Российского акустического общества (Н.Новгород, 24-28 сентября 2007), международной конференции молодых учёных «Ломоносов-2007», The 9th conference on mathematical and numerical aspects of waves propagation (Pau, France, 2009), 2nd African Conference on Computational Mechanics (Capetown, January 2011), на 8-ой международной конференции по обратным задачам (8th International Conference on Inverse Problems in Engineering ICIPE-2014, Польша, Краков, 12-15 мая 2014).

Основные результаты диссертации опубликованы в 10 работах в научных изданиях, из них 3 работы опубликованы в изданиях, рекомендуемых Перечнем ВАК при Министерстве образования и науки РФ, и 1 – в издании, индексируемом в базе данных SCOPUS.

#### **Структура и объем работы**

Диссертационная работа объемом 147 страниц состоит из введения, пяти глав, заключения и списка использованных источников из 57 наименований; содержит 62 рисунка и 6 таблиц.

### **ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ**

**Во введении** отражена актуальность темы исследования, сформулированы цели и задачи работы. Показаны новизна, а также достоверность и обоснованность результатов диссертационной работы. Кратко охарактеризованы методы исследования. Представлены теоретическая и практическая значимость работы.

**В первой главе** диссертационной работы проведен анализ возможных скрытых дефектов эластичных элементов конструкций и существующих методов и средств их обнаружения, для чего приведено краткое описание основных этапов функционирования СА с надувными тормозными устройствами (НТУ) (рисунок 1). Реализация НТУ требует решения новой, не свойственной проектированию традиционной космической техники, задачи разработки конструкции гибкой теплозащиты надувной оболочки, не препятствующей укладке НТУ в компактный объем в транспортном положении и последующему развертыванию в рабочее положение; и, в частности, проблемы обнаружения скрытых дефектов (протертостей оболочки НТУ после виброиспытаний, ее разрывов, уменьшения толщины и др.), которые могут появиться после неоднократных укладываний и развертываний НТУ. В свое время для выявления и классификации характерных изменений в состоянии гибкой теплозащиты, появляющихся после длительного пребывания ее в свернутом компактном положении, в

НПО имени С.А. Лавочкина был проведен целый комплекс испытаний. Данные испытания проводились как с использованием полномасштабных макетов НТУ, так и на модельных образцах характерных участков тепловой защиты (швов, плоской поверхности, криволинейных участков и т.д.) По результатам анализа дефектов была предложена их следующая классификация:

- трещины в слое СТИРОСИЛа, образовавшиеся при изгибе кремнеземной ткани таким образом, что слой СТИРОСИЛа оказывается снаружи (выпуклая складка). Такие трещины частично смыкаются при наддуве НТУ и переходе в рабочее положение;
- углубления в слое СТИРОСИЛа, образующиеся при складывании кремнеземной ткани таким образом, что слой СТИРОСИЛа оказывается внутри (вогнутая складка). Такое углубление появляется (раскрывается) при наддуве НТУ с образованием канавки треугольного профиля, которая образуется из-за смятия вулканизированного СТИРОСИЛа под давлением, сопровождающим размещение НТУ в компактном объеме;
- кратеры в поверхностном слое СТИРОСИЛа глубиной вплоть до кремнеземной ткани с характерным размером 5...7 мм. Такой кратер образуется за счет отслоения части СТИРОСИЛа при разъединении двух слипшихся поверхностей кремнеземной ткани, пропитанной СТИРОСИЛом;
- крестообразные трещины слоя СТИРОСИЛа в местах двойного (углового) перегиба кремнеземной ткани, образующегося при укладке НТУ.

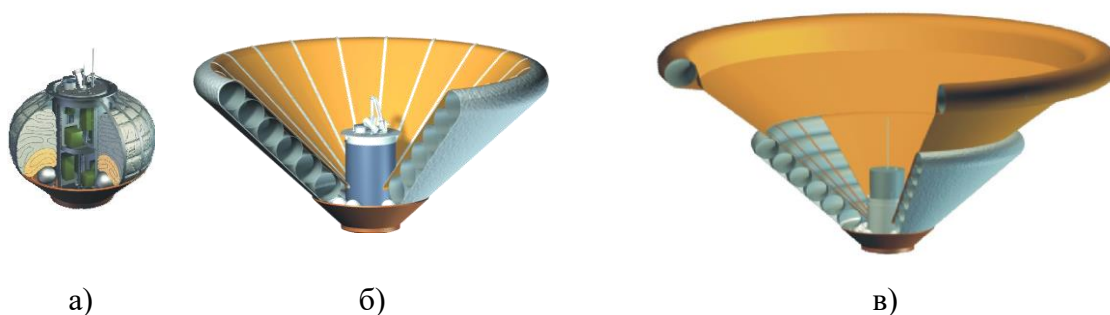


Рисунок 1 - Общий вид СА с НТУ:

- а) в сложенном положении, б) с развёрнутым основным каскадом,  
в) с дополнительным каскадом

Представлен обзор существующих подходов к дефектоскопии методами нелинейной акустики. Рассматривается разработанная автором экспериментальная установка для дистанционной (бесконтактной) диагностики структурных дефектов эластичных (резиноподобных) материалов. В основу работы установки положено нелинейное взаимодействие двух акустических пучков конечной амплитуды в исследуемом материале. Представлены результаты исследований. Недостатком традиционных подходов является то, что в них не применяются математически обоснованные методы определения

характеристик (размеров и/или величин) дефектов. Так как существующее экспериментальное оборудование обычно не позволяет вести прямое измерение характеристик дефектов, данная задача может быть решена путем сопоставления экспериментальных данных и физически обоснованных математических моделей заданной структуры с последующим их уточнением и выбором критериев сравнения. Основываясь на сделанных в работе [7] допущениях, можно считать, что распространение акустических волн в рассматриваемой системе описывается следующей краевой задачей:

$$\frac{\partial^2 p}{\partial t^2} - c^2 \frac{\partial^2 p}{\partial x^2} = \frac{1}{c^2 \rho} \varepsilon(x) \frac{\partial^2 p}{\partial t^2}, \quad x \in (0, d), t \in (0, t_{\max}] \quad (1)$$

$$p(x, 0) = p_0, \quad x \in [0, d], \quad (2)$$

$$\frac{\partial p}{\partial t}(x, 0) = 0, \quad x \in [0, d], \quad (3)$$

$$-\frac{\partial p}{\partial x}(0, t) = \rho_0 \frac{\partial^2 \xi_1}{\partial t^2}, \quad t \in (0, t_{\max}), \quad (4)$$

$$\frac{\partial^2 p}{\partial x^2}(d, t) = 0, \quad t \in (0, t_{\max}). \quad (5)$$

В большинстве случаев предполагается, что параметры математической модели  $\rho$ ,  $c$  и другие измеряются экспериментально или определяются расчетным путем. Предметом исследования в данной работе является параметр нелинейности  $\varepsilon(x)$ , который не может быть измерен или вычислен.

При использовании методов обратных задач для определения неизвестных характеристик предполагается наличие некоторой дополнительной информации о состоянии исследуемой системы. В качестве такой информации обычно берутся избыточные для прямой задачи (1) - (5) данные о поле давлений. В случае одномерной модели переноса – это измерение давления на поверхности тела, формально представляемого в виде дополнительного условия

$$p^{\text{exp}}(0, t) = f(t), \quad t \in (0, t_{\max}). \quad (6)$$

**Во второй главе** рассматриваются вопросы разработки алгоритма решения обратной задачи параметрической идентификации математической модели распространения продольных волн в многослойных элементах конструкций с целью обнаружения структурных неоднородностей:

$$\varepsilon_l(p) \frac{\partial^2 P_l}{\partial \tau^2} = c_l(p) \frac{\partial^2 P_l}{\partial x^2} + a_l(p) \frac{\partial P_l}{\partial \tau} + b_l(p) \frac{\partial P_l}{\partial x} + S_l(p), \quad (7)$$

$$\begin{aligned} X_{l-1} < x < X_l, l = \overline{1, L}, \quad 0 \leq \tau \leq \tau_{\max}, \\ P_l(x, 0) = P_l^0(x), X_{l-1} < x < X_l, l = \overline{1, L}, \end{aligned} \quad (8)$$



$$\frac{\partial P_l}{\partial \tau}(x,0) = 0, \quad X_{l-1} < x < X_l, \quad l = \overline{1, L}, \quad (9)$$

$$\alpha_1 \frac{\partial P_1(X_0, \tau)}{\partial x} + \beta_1 P_1(X_0, \tau) = v_1(P_1(X_0, \tau), \tau), \quad (10)$$

$$w_l \frac{\partial P_l(X_l, \tau)}{\partial x} = w_{l+1} \frac{\partial P_{l+1}(X_l, \tau)}{\partial x}, \quad l = \overline{1, L-1}, \quad (11)$$

$$P_l(X_l, \tau) = P_{l+1}(X_l, \tau), \quad l = \overline{1, L-1}, \quad (12)$$

$$\alpha_2 \frac{\partial P_L(X_L, \tau)}{\partial x} + \beta_2 P_L(X_L, \tau) = v_2(P_L(X_L, \tau), \tau), \quad (13)$$

в которой коэффициенты  $\varepsilon_l(P)$ ,  $a_l(P)$ ,  $b_l(P)$ ,  $c_l(P)$ ,  $S_l(P)$ ,  $l = \overline{1, L}$  являются функциями состояния системы  $P$ , а величины  $v_1$  и  $v_2$  зависят от состояния системы и времени. Введем следующие обозначения:  $X_m$  – координата расположения  $m$ -го датчика в  $l$ -ом слое. В точках установки датчиков известны экспериментально полученные зависимости состояния системы от времени

$$P_{\text{exp}}(X_m, \tau) = f_m(\tau), \quad m = 1, L. \quad (14)$$

В качестве критерия адекватности расчетной модели реальному процессу в работе предлагается функционал невязки, характеризующий среднеквадратичное отклонение рассчитанных давлений в точках установки датчиков от экспериментально измеренных

$$J = \sum_{m=1, L} \int_0^{\tau_m} \chi_m(\tau) [P(X_m, \tau) - f_m(\tau)]^2 d\tau. \quad (15)$$

В работе используется метод безусловной минимизации функционала  $J(u)$  с помощью градиентных методов первого порядка, например, скорейшего спуска или сопряженных градиентов

$$u^{s+1} = u^s - \gamma_s G(J_u^{(s)}), \quad s = 0, 1, \dots, s^*, \quad (16)$$

где  $s$  – номер итерации;  $\gamma_s$  – глубина спуска, выбираемая из условия

$$\gamma_s = \text{Arg min}_{\gamma > 0} J(u^s - \gamma G(J_u^{(s)})), \quad (17)$$

где  $G(J_u^{(s)})$  – оператор, характеризующий используемый метод минимизации;  $u^0$  – задаваемое априорно начальное приближение.

Важнейшей частью итерационных алгоритмов решения обратных задач является вычисление градиента функционала невязки. Реализация этой процедуры во многом определяет общую эффективность вычислительных алгоритмов и расчетных методик. Наиболее экономичный метод определения градиента базируется на использовании теории экстремальных задач для систем с распределенными параметрами. При этом вводится в рассмотрение сопряженная краевая задача, с помощью которой могут быть получены аналитические формулы для градиента. В рассматриваемой задаче неизвестные характеристики зависят от давления – переменной состояния

анализируемого процесса. В такой ситуации выражение для градиента можно получить, представив искомую зависимость в параметрическом виде. Универсальной формой параметризации является представление:

$$\begin{aligned} \varepsilon_n(P) &= \sum_{k=1}^{N_\varepsilon} \varepsilon_k \varphi_k(P), \quad a_n(P) = \sum_{k=1}^{N_a} a_k \varphi_k(P), \quad b_n(P) = \sum_{k=1}^{N_b} b_k \varphi_k(P), \\ c_n(P) &= \sum_{k=1}^{N_c} c_k \varphi_k(P), \quad S_n(P) = \sum_{k=1}^{N_s} S_k \varphi_k(P), \end{aligned} \quad (18)$$

где  $\varepsilon_k, k = \overline{1, N_\varepsilon}; a_k, k = \overline{1, N_a}; b_k, k = \overline{1, N_b}; c_k, k = \overline{1, N_c}; S_k, k = \overline{1, N_s}$  - неизвестные параметры,  $\varphi_i(P), i = \overline{1, 5}$  - заданная система базисных функций (в работе используются кусочно-постоянная аппроксимация и аппроксимация кубическими  $B$ -сплайнами). При этом получены следующие выражения для составляющих градиента функционала невязки:

$$\begin{aligned} \frac{\partial J}{\partial c_k} &\equiv J'_{c_k} = \int_0^{\tau_{\max}} \int_{X_{n-1}}^{X_n} \psi_l(x, \tau) \frac{\partial^2 P_n}{\partial x^2} \varphi_k(P) dx d\tau, \quad k = \overline{1, N_c}, \\ \frac{\partial J}{\partial \varepsilon_k} &\equiv J'_{\varepsilon_k} = - \int_0^{\tau_{\max}} \int_{X_{n-1}}^{X_n} \psi_n(x, \tau) \frac{\partial^2 P_n}{\partial \tau^2} \varphi_k(P) dx d\tau, \quad k = \overline{1, N_\varepsilon}, \\ \frac{\partial J}{\partial a_k} &\equiv J'_{a_k} = \int_0^{\tau_{\max}} \int_{X_{l-1}}^{X_l} \psi_l(x, \tau) \frac{\partial P_n}{\partial \tau} \varphi_k(P) dx d\tau, \quad k = \overline{1, N_a}, \\ \frac{\partial J}{\partial b_k} &\equiv J'_{b_k} = \int_0^{\tau_{\max}} \int_{X_{n-1}}^{X_n} \psi_n(x, \tau) \frac{\partial P_n}{\partial x} \varphi_k(P) dx d\tau, \quad k = \overline{1, N_b}, \\ \frac{\partial J}{\partial S_k} &\equiv J'_{S_k} = \int_0^{\tau_{\max}} \int_{X_{n-1}}^{X_n} \psi_n(x, \tau) \varphi_k(P) dx d\tau, \quad k = \overline{1, N_s}. \end{aligned} \quad (19)$$

Основанные на решении соответствующей сопряженной краевой задачи:

$$\begin{aligned} \varepsilon_l \frac{\partial^2 \psi_l}{\partial \tau^2} &= c_l \frac{\partial^2 \psi_l}{\partial x^2} + 2 \frac{\partial \psi_l}{\partial x} \frac{dc_l}{dP} \frac{\partial p_l}{\partial x} + 2 \frac{dc_l}{dP} \frac{\partial^2 P_l}{\partial x^2} \psi_l + \psi_l \frac{d^2 c_l}{dP^2} \left( \frac{\partial P_l}{\partial x} \right)^2 \\ -2 \frac{d\varepsilon_l}{dP} \frac{\partial^2 P_l}{\partial \tau^2} \psi_l &- 2 \frac{\partial \psi_l}{\partial \tau} \frac{d\varepsilon_l}{dP} \frac{\partial P_l}{\partial \tau} - \psi_l \frac{d^2 \varepsilon_l}{dP^2} \left( \frac{\partial P_l}{\partial \tau} \right)^2 - a_l \frac{\partial \psi_l}{\partial \tau} - b_l \frac{\partial \psi_l}{\partial \tau} + \frac{\partial S_l}{\partial P} \psi_l, \end{aligned} \quad (20)$$

$$X_{l-1} < x < X_l, \quad 0 < \tau \leq \tau_{\max}, \quad l = \overline{1, L},$$

$$\psi_l(x, \tau_{\max}) = 0,$$

$$X_{l-1} \leq x \leq X_l, \quad l = \overline{1, L},$$

$$\frac{\partial \psi}{\partial t}(x, \tau_{\max}) = 0, \quad X_{l-1} \leq x \leq X_l, \quad l = \overline{1, L}, \quad (22)$$

$$\frac{c_l}{w_l} \psi_l(X_l, \tau) = \frac{c_{l+1}}{w_{l+1}} \psi_{l+1}(X_l, \tau), \quad l = \overline{1, L-1}, \quad 0 < \tau \leq \tau_{\max}, \quad (23)$$

$$\alpha_1 c_1 \frac{\partial \psi_1(X_0, \tau)}{\partial x} + \left[ \beta_1 c_1 - \frac{\partial v_1(P_1(X_0, \tau), \tau)}{\partial P} c_1 + \alpha_1 \frac{dc_1}{dP} \frac{\partial P_1}{\partial x} - \alpha_1 b_1 \right] \psi_1(X_0, \tau) - 2\alpha_1 [P_1(X_0, \tau) - f_1(\tau)] = 0, \quad 0 < \tau \leq \tau_{\max}, \quad (24)$$

$$c_l \frac{\partial \psi_l(X_l, \tau)}{\partial x} - c_{l+1} \frac{\partial \psi_{l+1}(X_l, \tau)}{\partial x} + \left[ \frac{dc_l}{dP} \frac{\partial P_l}{\partial x} - b_l \right] \psi_l(X_l, \tau) - \left[ \frac{dc_{l+1}}{dP} \frac{\partial P_{l+1}}{\partial x} - b_{l+1} \right] \psi_{l+1}(X_l, \tau) = 0, \quad l = \overline{1, L-1}, \quad 0 < \tau \leq \tau_{\max}, \quad (25)$$

$$\alpha_2 c_L \frac{\partial \psi_L(X_L, \tau)}{\partial x} + \left[ \beta_2 c_L - \frac{\partial v_2(p_L(X_L, \tau), \tau)}{\partial P} c_L + \alpha_2 \frac{dc_L}{dP} \frac{\partial P_L}{\partial x} - \alpha_2 b_L \right] \psi_L(X_L, \tau) - 2\alpha_2 [P_L(X_L, \tau) - f_L(\tau)] = 0, \quad 0 < \tau \leq \tau_{\max}. \quad (26)$$

Также в работе получена система линейных алгебраических уравнений для вычисления составляющих вектора параметра спуска

$$\sum_{i=1}^3 \gamma_i \sum_{m=1, L}^{\tau_m} \int_0^{\tau_m} \left[ \mathcal{G}_m^{(r)}(X_m, \tau) \gamma_s G(J^{(s)}) \mathcal{G}_m^{(i)}(X_m, \tau) \gamma_s G(J^{(s)}) \right] d\tau = - \sum_{m=1, L}^{\tau_m} \int_0^{\tau_m} [P(X_m, \tau) - f_m(\tau)] \mathcal{G}_m^{(r)}(X_m, \tau) \gamma_s G(J^{(s)}) d\tau, \quad i = \overline{1, 5}, \quad (27)$$

где приращение  $\mathcal{G}_{l,m}(x, \tau)$  определяется из решения краевой задачи:

$$\begin{aligned} \varepsilon_l \frac{\partial^2 \mathcal{G}_l}{\partial \tau^2} &= c_l \frac{\partial^2 \mathcal{G}_l}{\partial x^2} + a_l \frac{\partial \mathcal{G}_l}{\partial \tau} + b_l \frac{\partial \mathcal{G}_l}{\partial x} + S_l + \\ &+ \left[ \frac{dc_l}{dP} \frac{\partial^2 \mathcal{G}_l}{\partial x^2} + \frac{da_l}{dP} \frac{\partial \mathcal{G}_l}{\partial \tau} + \frac{db_l}{dP} \frac{\partial \mathcal{G}_l}{\partial x} + \frac{dS_l}{dP} - \frac{\partial^2 P_l}{\partial \tau^2} \frac{d\varepsilon_l}{dP} \right] \mathcal{G}_l + \\ &+ \delta_n^l \left[ - \frac{\partial^2 P_l}{\partial \tau^2} \gamma_s \sum_{k=1}^{N_\varepsilon} G_k \phi_k(P) + \frac{\partial^2 P_l}{\partial x^2} \gamma_s \sum_{k=1}^{N_c} G_k \phi_k(P) + \frac{\partial p_l}{\partial \tau} \gamma_s \sum_{k=1}^{N_a} G_k \phi_k(P) + \right. \\ &\left. + \frac{\partial p_l}{\partial x} \gamma_s \sum_{k=1}^{N_b} G_k \phi_k(P) + \gamma_s \sum_{k=1}^{N_s} G_k \phi_k(P) \right], \end{aligned} \quad (28)$$

$$X_{l-1} < x < X_l, \quad 0 < \tau \leq \tau_{\max}, \quad l = \overline{1, L}, \quad \mathcal{G}_l(x, 0) = 0, \quad X_{l-1} \leq x \leq X_l, \quad l = \overline{1, L}, \quad (29)$$

$$\frac{\partial \mathcal{G}_l}{\partial \tau}(x, 0) = 0, \quad X_{l-1} \leq x \leq X_l, \quad l = \overline{1, L}, \quad (30)$$

$$\alpha_1 \frac{\partial \mathcal{G}_1(X_0, \tau)}{\partial x} + \left( \beta_1 - \frac{\partial v_1(P_1(X_0, \tau), \tau)}{\partial P} \right) \mathcal{G}_1(X_0, \tau) = 0, \quad 0 < \tau \leq \tau_{\max}, \quad (31)$$

$$\mathcal{G}_l(X_l, \tau) = \mathcal{G}_{l+1}(X_l, \tau), \quad l = \overline{1, L-1}, \quad 0 < \tau \leq \tau_{\max}, \quad (32)$$

$$w_l \frac{\partial \mathcal{G}_l(X_l, \tau)}{\partial x} = w_{l+1} \frac{\partial \mathcal{G}_{l+1}(X_l, \tau)}{\partial x}, \quad l = \overline{1, L-1}, \quad 0 < \tau \leq \tau_{\max}, \quad (33)$$

$$\alpha_2 \frac{\partial \mathcal{G}_L(X_L, \tau)}{\partial x} + \left( \beta_2 - \frac{\partial v_2(P_L(X_L, \tau), \tau)}{\partial P} \right) \mathcal{G}_L(X_L, \tau) = 0, \quad 0 < \tau \leq \tau_{\max}. \quad (34)$$

**В третьей главе** рассматриваются вопросы разработки соответствующих вычислительных алгоритмов. Предлагаемый подход основывается на введении обобщенной математической модели в виде краевой задачи для нелинейного гиперболического уравнения второго порядка в одномерной по пространственной переменной многослойной области с произвольными граничными условиями на внешних границах.

Одним из наиболее универсальных методов численного решения краевых задач в одномерной постановке является метод конечных разностей, который используется в данной работе при построении вычислительных алгоритмов.

Коэффициенты математической модели при решении краевых задач вычисляются путем линейной интерполяции таблично заданных функций, что существенно уменьшает время вычислений. Если исходные табличные данные задаются с большой дискретностью, предварительно осуществляется их интерполяция кубическими сплайнами с целью построения последующей линейной интерполяции. В работе используется пятиточечная неявная схема, и конечно-разностный аналог уравнения (1) представляется в виде

$$\frac{P_i^j - 2P_i^{j-1} + P_i^{j-2}}{\Delta \tau^2} = \left( \frac{\left( \frac{c}{\varepsilon} \right)_i^j + \left( \frac{c}{\varepsilon} \right)_{i+1}^j}{2} \frac{P_{i+1}^j}{\Delta x^2} - \frac{\left( \frac{c}{\varepsilon} \right)_{i+1}^j + 2 \left( \frac{c}{\varepsilon} \right)_i^j + \left( \frac{c}{\varepsilon} \right)_{i-1}^j}{2} \frac{P_i^j}{\Delta x^2} + \frac{\left( \frac{c}{\varepsilon} \right)_i^j + \left( \frac{c}{\varepsilon} \right)_{i-1}^j}{2} \frac{P_{i-1}^j}{\Delta x^2} \right) + \left( \left( \frac{a}{\varepsilon} \right)_{i+1/2}^j \frac{P_{i+1}^j - P_i^j}{\Delta \tau} + \left( \frac{a}{\varepsilon} \right)_{i-1/2}^j \frac{P_i^j - P_{i-1}^j}{\Delta \tau} \right) + \left( \left( \frac{b}{\varepsilon} \right)_{i+1/2}^j \frac{P_{i+1}^j - P_i^j}{\Delta x} + \left( \frac{b}{\varepsilon} \right)_{i-1/2}^j \frac{P_i^j - P_{i-1}^j}{\Delta x} \right) + \left( \frac{S}{\varepsilon} \right)_i^j; \quad (35)$$

$$\text{где } \left( \frac{c}{\varepsilon} \right)_{i \pm 1/2}^j = \frac{1}{2} \left[ \left( \frac{c}{\varepsilon} \right)_i^j + \left( \frac{c}{\varepsilon} \right)_{i \pm 1}^j \right]; \quad \left( \frac{c}{\varepsilon} \right)_i^j = \left( \frac{c(P_{i,j})}{\varepsilon(P_{i,j})} \right).$$

После преобразований получаем систему линейных уравнений с трехдиагональной матрицей

$$-A_i^j P_{i-1}^j + D_i^j P_i^j - B_i^j P_{i+1}^j = F_i^j, \quad (36)$$

$$i = \overline{N_{l-1} + 2, N_l - 1}, \quad l = \overline{1, L}.$$

**В четвертой главе** на основе результатов математического моделирования проведен анализ точности и достоверности получаемых результатов. На этом этапе исследований наиболее эффективным методом исследований является вычислительный эксперимент. Полагая, что все коэффициенты математической модели и расположение дефекта известны,

решается прямая задача нелинейной акустики в образце. После чего с использованием полученного поля давлений в предполагаемых местах установки датчиков формируется дополнительная информация, необходимая для решения обратной задачи, затем решается обратная задача по определению характеристик материала. Такой подход дает возможность проанализировать влияние погрешностей задания исходных данных на результаты решения обратной задачи. Идентифицируемой функцией в задаче (1 - 5) является параметр нелинейности  $\varepsilon(x)$ . Случайные погрешности во входных данных при моделировании решения обратной задачи формируются по формуле

$$f_m(\tau) = \bar{f}_m(\tau)(1 + \varpi \delta_f(\tau)), \quad m = \overline{1, M}, \quad (37)$$

где  $\bar{f}_m(\tau)$  - «точное» показание датчика давления, полученное из решения прямой задачи;  $\varpi$  - случайная величина, распределенная по нормальному закону с дисперсией, равной 1 и математическим ожиданием, равным 0;  $\delta_f(\tau)$  - максимально возможная относительная погрешность. Точное значение восстанавливаемого параметра нелинейности приведено на рисунке 2. В качестве начального приближения определяемой функции, если не указано другое, задается значение  $\varepsilon_0 = 0,5$ . При математическом моделировании рассматривались образцы толщиной 0,005 м. Погрешность решения обратной задачи в данной работе определяется как

$$\delta \varepsilon = \|\varepsilon(x) - \bar{\varepsilon}(x)\|_{L_2} / \|\bar{\varepsilon}(x)\|_{L_2}, \quad (38)$$

где  $\varepsilon$  и  $\bar{\varepsilon}$  – восстановленные и точные значения соответственно.

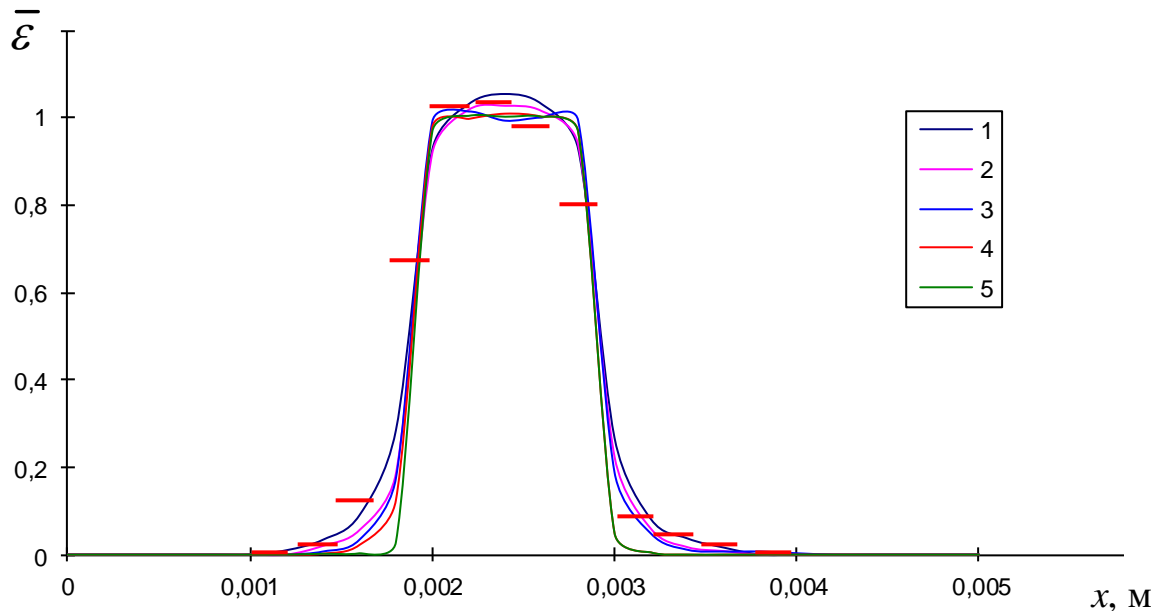
В работе рассматривается влияние числа параметров аппроксимации на точность получаемого решения для различных уровней ошибок во входных данных  $\delta_f$ , а также сравниваются различные типы аппроксимации.

На рисунке 2 приведены результаты аппроксимации искомых функций разными аппроксимирующими функциями. Если число параметров равно 9, то восстановленная характеристика наиболее близка к заданной величине. В работе анализируется точность решения обратной задачи в зависимости от погрешностей задания трех параметров: функции (4), определяющей градиент акустического давления на поверхности образца, плотности материала и скорости звука в материале. Погрешности моделировались при положительном систематическом смещении, при этом уровень относительной величины максимальной погрешности  $\delta = 5\%$ . Для этого использовались выражения:

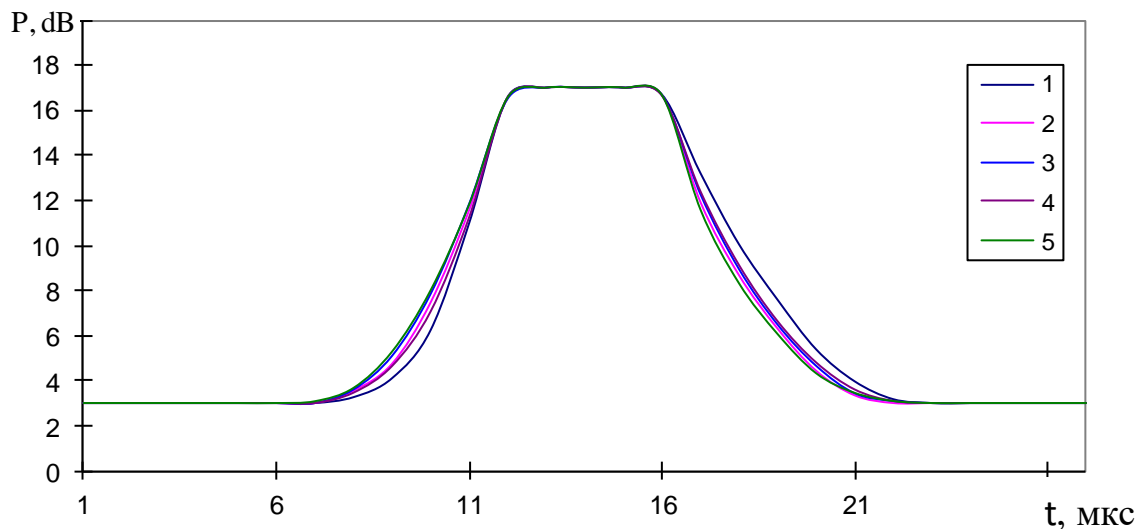
$$\frac{\partial^2 \xi}{\partial \tau^2}(\tau) = \frac{\partial^2 \bar{\xi}}{\partial \tau^2}(\tau)(1 + \delta_\xi), \quad \rho = \bar{\rho}(1 + \delta_\rho), \quad c = \bar{c}(1 + \delta_c). \quad (39)$$

В качестве примера на рисунке 3 показаны результаты определения искомой характеристики при погрешности в задании граничного условия на

левой границе. Представленные результаты показывают достаточно слабое влияние погрешностей на форму искомой функции и более существенное влияние на ее значения. Следует отметить, что рассматриваемая ОЗТ является инструментом дефектоскопии материала, и, следовательно, для практики существенно более важна форма искомой функции, позволяющая судить о размерах и координатах дефекта.



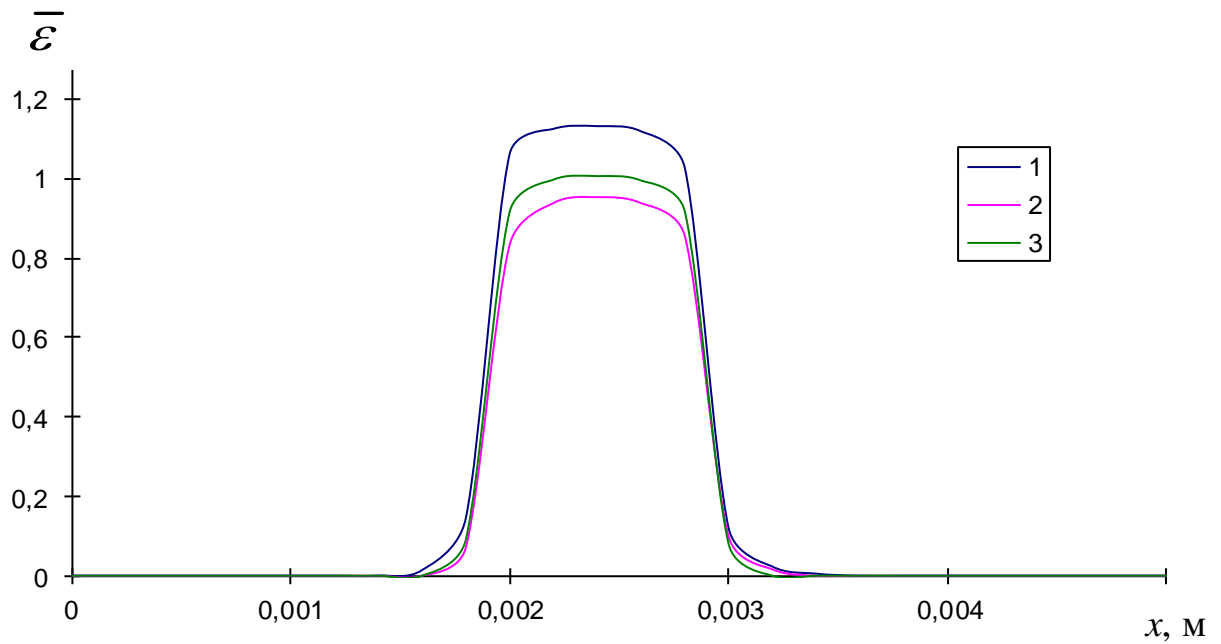
а)



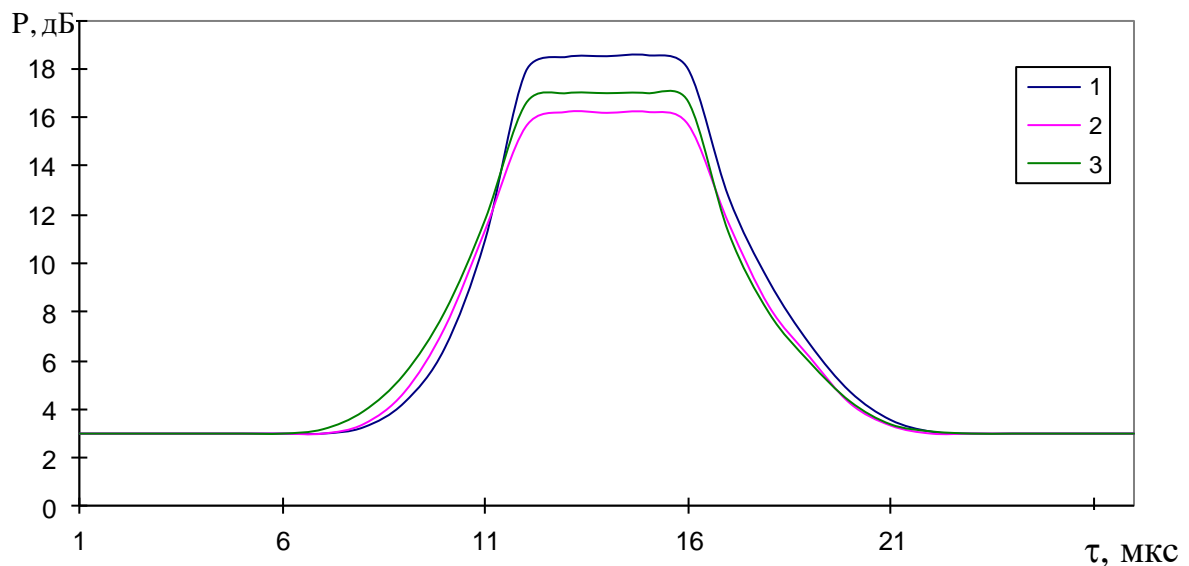
б)

Рисунок 2 – Результаты восстановления  $\varepsilon(x)$  (а) и зависимости  $p(0, \tau)$  и  $f(\tau)$  (б):

1, 2, 3 – исходные данные с погрешностью  $\delta_f = 10\%$  относительно текущего значения возмущаемой функции и числе параметров равном 5, 9, 13;  
 4 – восстановленные значения при кусочно-постоянной аппроксимации (число параметров равно 20), 5 – точные значения



а)



б)

Рисунок 3 – Результаты восстановления  $\varepsilon(x)$  (а) и зависимостей

$p(0, \tau)$  и  $f(\tau)$  (б) при погрешности задания граничного условия  $\left(\frac{\partial^2 \xi_1}{\partial \tau^2}\right)$ :

1, 2 – с погрешностью  $\delta_\xi = +10\%$  и  $\delta_\xi = 0-10\%$ ; 3 – заданная зависимость

При реализации экстремальных методов параметрической идентификации для решения обратных задач важнейшим является вопрос об останове итерационного процесса. Следуя подходу, предложенному И.С. Кабанихиным, можно показать, что рассматриваемая в диссертации обратная задача является условно корректной. С математической точки зрения в этом случае минимизацию функционала можно вести до

минимального значения. Однако, несмотря на то, что задача (1) - (6) условно корректна, при ее решении используются экспериментальные данные, измеряемые с погрешностями. Возникает вопрос о целесообразности применения останова итерационного процесса по невязке для условно корректной обратной задачи. В этом случае функционал (15) минимизируется до выполнения условия

$$J(\bar{\varepsilon}) \leq \delta^2 \quad (40)$$

где  $\delta^2 = \int_0^{\tau_{\max}} \sigma_m^2(\tau) d\tau$  - интегральная ошибка  $f(\tau)$ ,  $\sigma_m$  - дисперсия измерений.

Значения минимизируемого функционала и соответствующих значений определяемой функции при использовании различного числа параметров аппроксимации представлены на рисунках 4 и 5. Представленные результаты также подтверждают возможность выбора числа параметров аппроксимации, исходя из принципа невязки: следует выбирать минимальное число параметров аппроксимации, обеспечивающее достижение уровня невязки  $\delta^2$ .

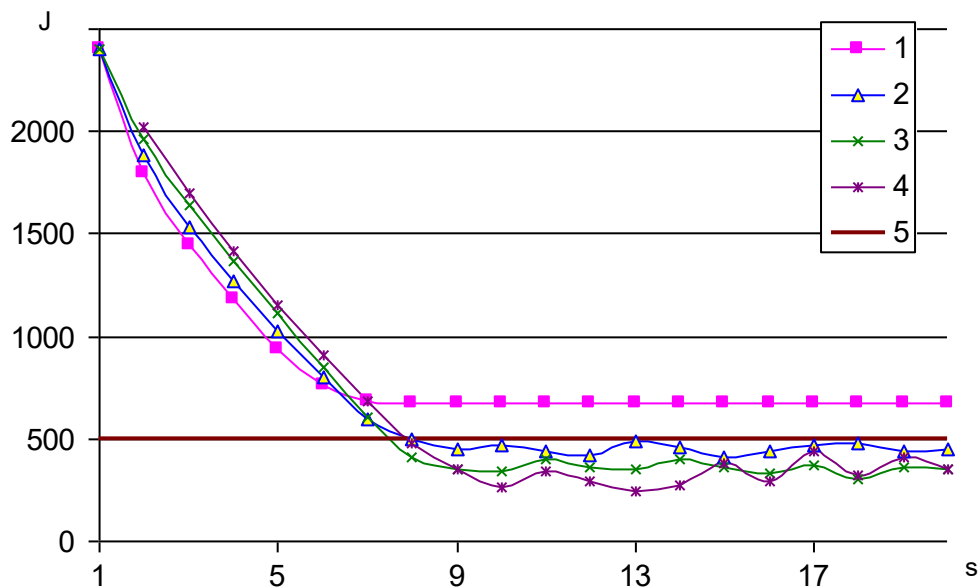


Рисунок 4 – Влияние числа параметров аппроксимации  $\varepsilon(x)$  на значения минимизируемого функционала по итерациям:

- 1 – число параметров равно 5, 2 – число параметров равно 9,
- 3 – число параметров равно 13, 4 – кусочно-постоянная аппроксимация,
- 5 – значение интегральной погрешности измерений  $\delta^2$

**В пятой главе** представлены результаты разработки и апробации экспериментально-расчетного метода дефектоскопии теплозащитных покрытий космических аппаратов. В качестве примера рассматривается дефектоскопия материалов гибкой тепловой защиты. Экспериментальный образец представляет собой пластину из исследуемого материала в форме



прямоугольного параллелепипеда с отношением толщины к длине ребра не менее 1:20. Такое соотношение размеров образца, а также использование предложенной схемы акустического нагружения образцов обеспечивают в процессе испытания распространение акустических волн в рабочей зоне образца близкое к одномерному.

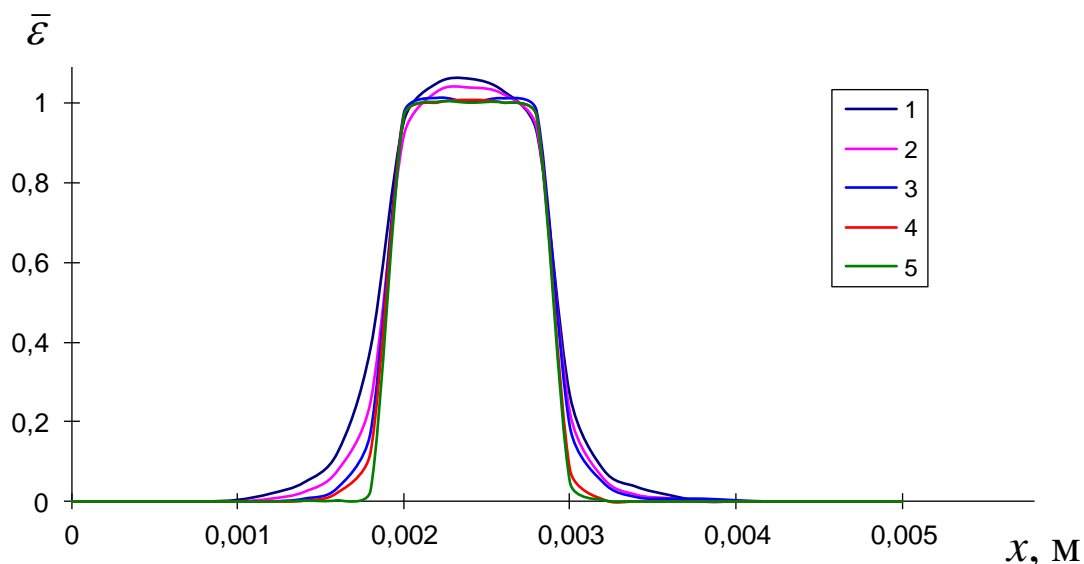


Рисунок 5 – Результаты восстановления  $\varepsilon(x)$  :

1 – число параметров аппроксимации равно 5 (неограниченная минимизация), 2 – число параметров аппроксимации равно 5 (останов по невязке), 3 – число параметров аппроксимации равно 9 (неограниченная минимизация), 4 – число параметров аппроксимации равно 9 (останов по невязке), 5 – заданная зависимость

Предполагается, что в начальный момент времени в образце реализуется равномерное распределение давления. Разработанный алгоритм решения обратной задачи нелинейной акустики может быть использован для определения характеристик дефектов теплозащитного материала непосредственно для каждой точки поверхности. Однако, при этом возникает непростой вопрос о дискретности перемещения измерительного элемента по поверхности, так как для каждой исследуемой точки необходимо проводить измерения и решать обратную задачу (1) – (6). Для повышения практической эффективности разработанного метода предлагается использование двухступенчатого исследования материала:

- сканирование поверхности и обнаружение дефектов методом, описанным в главе 1;
- исследование характеристик дефекта путем нестационарного измерения акустического давления и решения обратной задачи (1) – (6).

Первый метод построен на анализе комбинационного сигнала с двойной частотой, формирующегося в области нелинейности. При распространении в веществе акустическая волна с частотой  $f_1$  в точке

неоднородности структуры материала порождает излучение на комбинационных частотах, половинной и удвоенной. Эксперименты показали [6], что эффективность излучения на удвоенной частоте почти в 4 раза превышает эффективность излучения на половинной частоте, поэтому в предлагаемом подходе исследуется сигнал с частотой  $2f_1$ .

В результате эксперимента требовалось получить зависимость акустического давления с частотой  $2f_1$  от координаты поверхности образца с целью обнаружения местоположения структурной нелинейности.

Для решения задачи необходимо произвести следующие измерения:

1. Измерение давления на частоте  $f_1$  в образце без дефектов.
2. Измерение давления на частоте  $2f_1$  в образце без дефектов для определения условного нулевого уровня давления и нормировки оборудования с учетом возможного фона, эффектов в воздухе, на границе образца и на затворе фокусирующей диафрагмы.
3. Просканировать образец по координатным осям  $X$  и  $Y$  для построения зависимости давления  $P(2f_1)$  от координаты поверхности, измерения могут производиться как на отраженном, так и на прошедшем сигнале. В рассматриваемом случае для обеспечения более высокой эффективности, а также во избежание ослабления сигнала с частотой  $2f_1$  диафрагмой измерения проводились за образцом.

Экспериментальная установка (рисунок б) состоит из исследуемого образца, закрепленного в рамке на подвижном штативе. Перед образцом на расстоянии 10 см расположен ультразвуковой излучатель (УЗИ) акустического сигнала с частотой  $f_1 = 39\text{кГц}$ . В непосредственной близости к образцу на расстоянии 0,5 см установлена металлическая пластина толщиной 0,3 см с фокусирующим отверстием (диафрагмой) диаметром 1,5 см. За образцом расположен ультразвуковой приемник (УЗП), настроенный на частоту  $2f_1 = 78\text{кГц}$ . Сигнал с генератора частоты (ГЧ) подается на УЗИ и излучается с частотой  $f_1$  и амплитудой давления 96 дБ. УЗП регистрирует сигнал и отправляет на осциллограф для непосредственного контроля и на внешний модуль АЦП управляющего компьютера для регистрации данных.

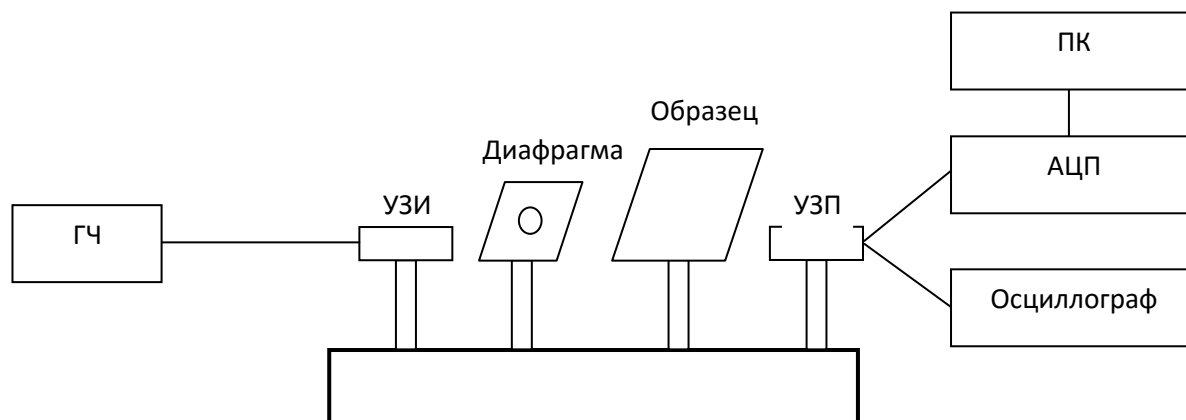


Рисунок б – Принципиальная блок-схема экспериментальной установки

Целью второго этапа акустических испытаний являлось определение следующих характеристик образцов исследуемого материала в процессе их нестационарного нагружения:

- нестационарного акустического давления  $p^{\text{exp}}(0, \tau), \tau \in (0, \tau_{\text{max}})$  на поверхности образца;
- градиента давления  $\frac{\partial p}{\partial x}(0, \tau), \tau \in (0, \tau_{\text{max}}]$  подводимого к нагружаемой поверхности образца.

При испытаниях использовались следующие режимы и условия испытаний:

- начальные условия (фактически акустический фон):  $p_0 = 8 \text{ дБ}, x \in [0, d]$ ;
- нагружение образцов проводилось при постоянном давлении 96 дБ;
- на обратной поверхности предполагается «естественное» граничное условие:  $\frac{\partial^2 p}{\partial x^2}(d, \tau) = 0, \tau \in (0, \tau_{\text{max}}]$ , что позволит в дальнейшем проводить

дефектоскопию не только плоских образцов материала, но и целых конструкций (в том числе и в надутом состоянии). Схема и общий вид установки приведены на рисунках 7 и 8.

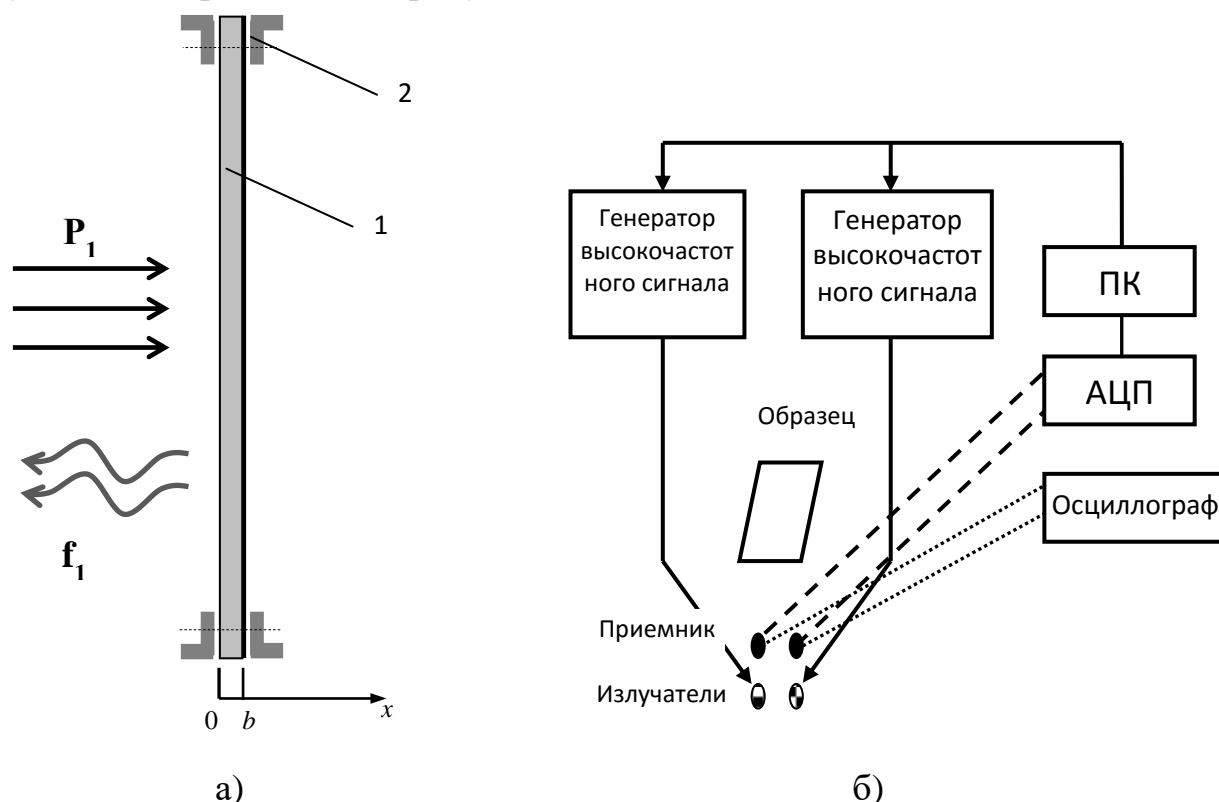


Рисунок 7: а) Схема испытаний образцов материала:

1 – образец материала, 2 – силовая рамка экспериментального модуля,  $p_1$  – акустическое нагружение образца материала,  $f_1$  – нестационарное измерение давления на внешней поверхности;

б) Схема установки

Используемая технология холодного отверждения (вулканизации) материала позволяет устанавливать искусственные дефекты в процессе изготовления образца. Для методической отработки разработанного подхода было необходимо обеспечить максимально точное предварительное определение координат установки дефектов. Для этого определение фактических координат дефектов в образце осуществлялось с помощью методов рентгеноскопии. Было изготовлено и испытано 5 образцов с различными естественными и заложенными дефектами (таблица 1).

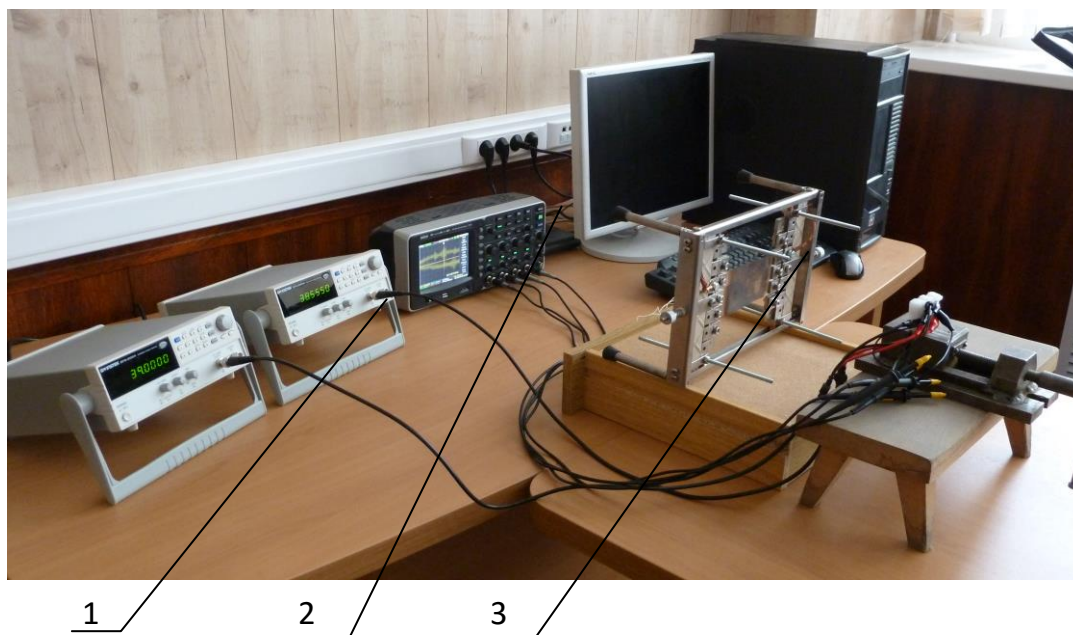


Рисунок 8 – Общий вид установки:

1 – генератор высокочастотного сигнала, 2 – осциллограф,  
3 – экспериментальный модуль

Таблица 1 – Характеристики дефектов образцов исследуемого материала

№ образца	Размеры (длина × ширина × толщина в центре (средняя толщина)) [мм]	Масса [г]	Плотность материала [кг/м <sup>3</sup> ]	Описание дефекта
2	60,0 × 60,0 × 5,65	19,72	972,87	Нагружаемая поверхность без дефектов. Заложен дефект на высоте 3 см от нижнего края образца и на расстоянии 3 см от левого края и на расстоянии 1,2 мм от внутренней поверхности – силикагелевый шарик диаметром 1,8 мм

Изготовленные образцы измерялись и взвешивались, рассчитывалась плотность материала, проводился визуальный контроль внешнего вида образцов.

На первом этапе штатных испытаний были произведено пошаговое сканирование образцов и запись сигнала с частотой  $2f_1$  в каждой точке. Такие измерения позволили определить нулевое значение давления  $P(2f_1)$  с учетом фонового сигнала в воздухе и на диафрагме (шаг сканирования во всех экспериментах был равен 0,5 см).

На рисунке 9 представлена зависимость давления  $P(2f_1)$  от координаты  $X$  в точках с шагом 0,5 см.  $P(2f_1) = \text{const}$  (8 дБ) для образца №2. Дефект в виде силикагелевого шарика был расположен на высоте 3 см от нижнего края образца и на расстоянии 3см от левого края. Видно, что при установке центра диафрагмы на 2 см от левого края образца появляется дополнительное давление  $P(2f_1)=11\text{дБ}$ , на 2,5 см  $P(2f_1)=14\text{дБ}$ , на 3 см  $P(2f_1)=17\text{дБ}$ , на 3,5 см  $P(2f_1)=14\text{дБ}$ , на 4 см  $P(2f_1)=11\text{дБ}$ , на 4,5см  $P(2f_1)=8\text{дБ}$ , что соответствует нормальному уровню фонового давления. Таким образом, можно сделать вывод об успешном однозначном определении области структурной нелинейности в образце.

Окончательные испытания образцов материала проводились с учетом результатов первого этапа испытаний образцов №№ 1 – 5. Результаты нестационарных измерений зависимостей  $p^{\text{exp}}(0, \tau), \tau \in (0, \tau_{\text{max}})$  после первичной обработки и результаты определения зависимости  $\bar{\varepsilon}(x)$  для исследуемого образца №2 представлены на рисунках 10 и 11. Максимальные и среднеквадратичные расхождения расчетных и измеренных давлений представлены в таблице 2.

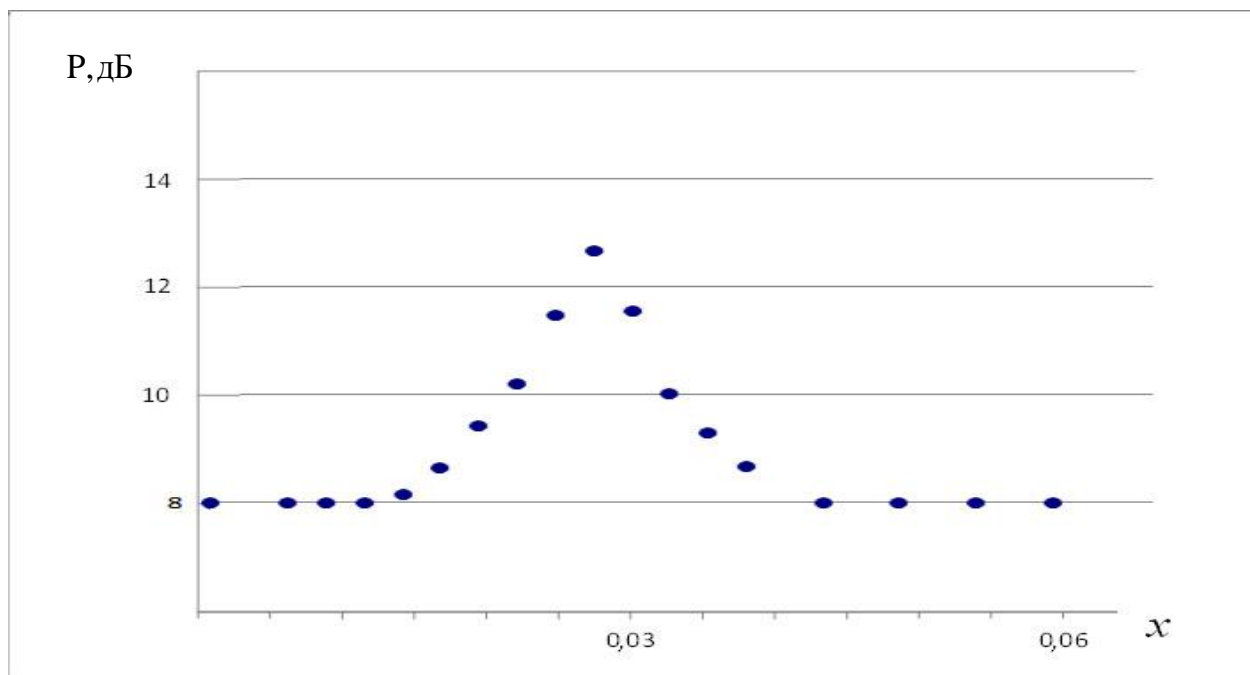


Рисунок 9 - Зависимость давления  $P(2f_1)$  от координаты (испытание №2)

Таблица 2 – Расхождения измеренных и расчетных давлений в образцах

№ эксперимента	$\delta_{\max}$	$\delta^2$
2	1,7	0,12
3	0,5	0,04
5	0,6	0,05

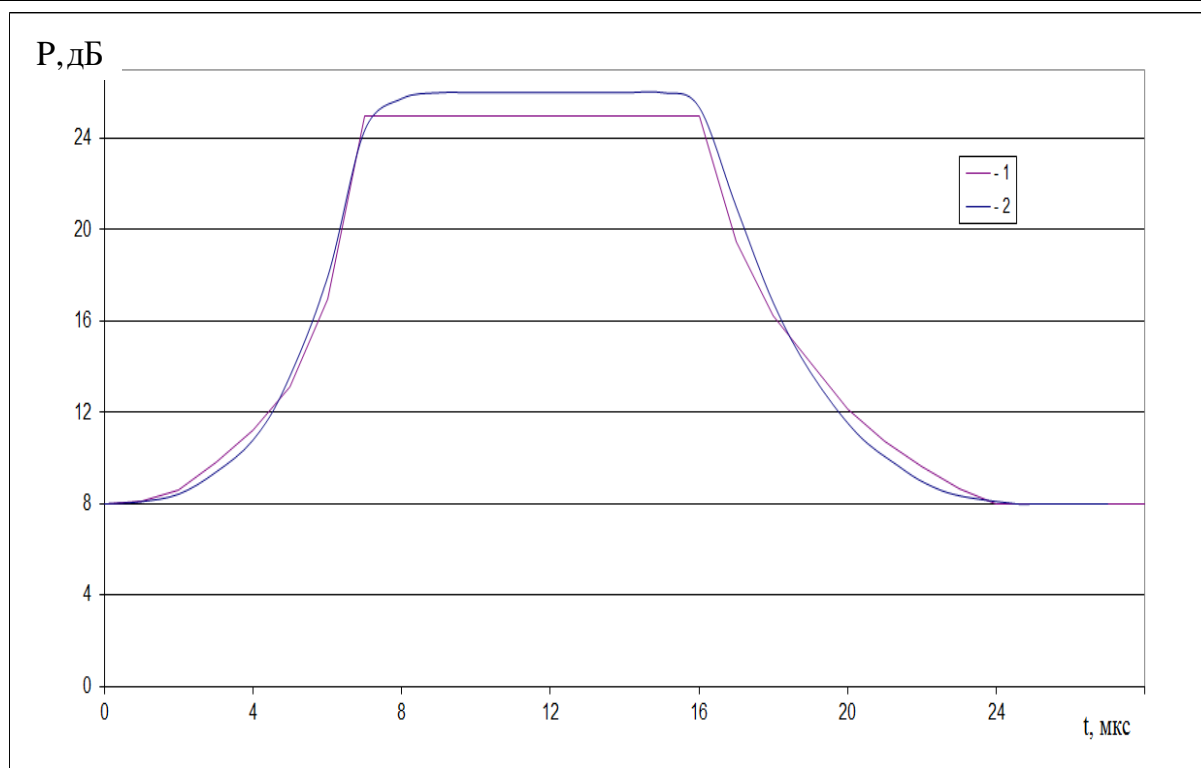


Рисунок 10 – Давление на внешней поверхности для образца №2: 1 – расчетное значение, 2 – экспериментально измеренное значение

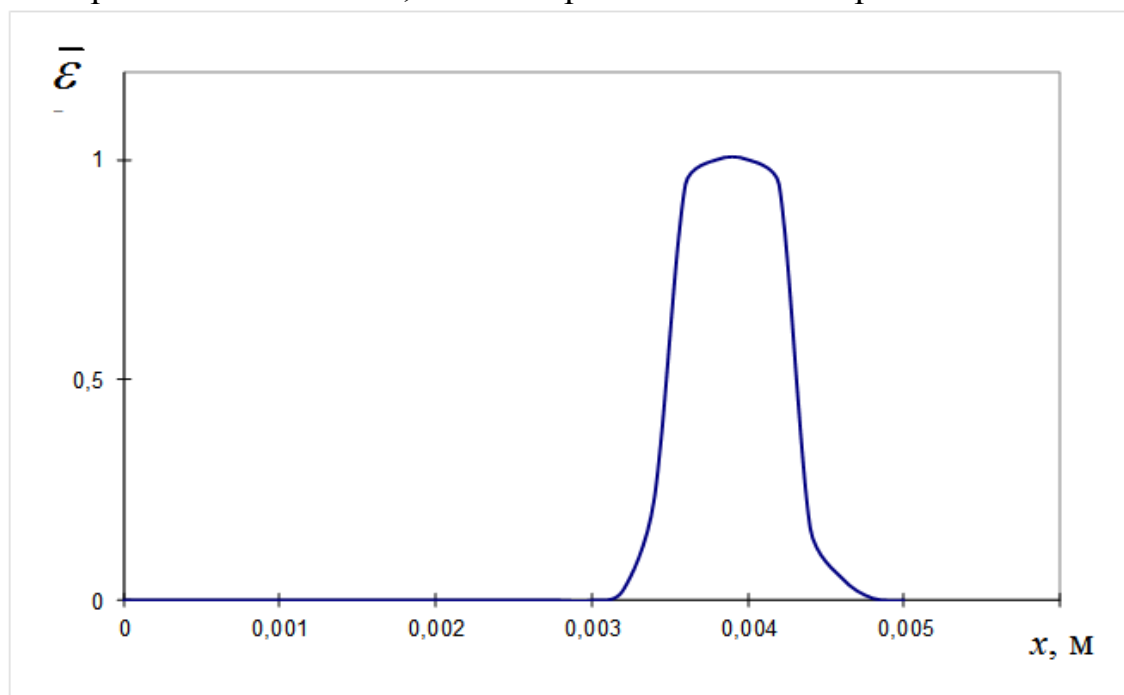


Рисунок 11 – Значения коэффициента нелинейности  $\bar{\varepsilon}(x)$ , определенного для образца № 2

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Проведен анализ возможных скрытых дефектов эластичных элементов конструкций и существующих методов и средств их обнаружения, а также существующих математических моделей распространения продольных волн в сплошной среде с целью выбора обобщенной математической модели, удовлетворяющей инженерным требованиям для решения поставленной задачи.

2. Разработаны методы и алгоритмы для дефектоскопии элементов конструкции надувных оболочек тормозных экранов СА, основанные на параметрической идентификации математической модели распространения продольных волн в упругой среде методом итерационной регуляризации.

3. Разработан вычислительный алгоритм для реализации параметрической идентификации математической модели распространения продольных волн в сплошной среде. Важной отличительной особенностью алгоритма является получение однородной разностной схемы для многослойной области.

4. Проведен анализ эффективности разработанного алгоритма с помощью вычислительного эксперимента, и сделаны выводы о влиянии различных факторов на точность решения обратной задачи нелинейной акустики.

5. Разработан и реализован прототип экспериментальной установки для определения геометрических параметров дефектов эластичных материалов надувных оболочек тормозных аэродинамических экранов СА на основе методов обратных задач нелинейной акустики.

6. Проведены экспериментально-расчетные исследования механических свойств (определение коэффициента нелинейности распространения акустических волн) теплозащитного материала СТИРОСИЛ с искусственно созданными дефектами. На основе полученных экспериментальных данных определены геометрические параметры искусственно созданных дефектов. Сопоставлены акустические давления, полученные в результате расчета с использованием определенного коэффициента нелинейности, и давления, измеренные в результате эксперимента. При этом расхождение между расчетными и измеренными давлениями составляет: среднеквадратичное отклонение до 0,12 дБ, максимальное отклонение до 1,7 дБ. Определяемые геометрические параметры дефектов практически совпадают с реальными значениями.

Разработанные методы могут быть использованы для повышения эффективности и качества дефектоскопии в других отраслях науки и техники, в которых возникает необходимость исследования при разработке конструкций и систем из эластичных материалов, а именно: в энергетике, химическом машиностроении, двигателестроении, медицине и т.д.

В качестве следующего этапа развития научных исследований по данной тематике могут рассматриваться обратные задачи дефектоскопии в двух- и трехмерной постановке.

## **ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИОННОЙ РАБОТЫ**

### **Публикации в изданиях, индексируемых в базе данных SCOPUS**

1. Korobov A.I., Izosimova M.Y., Nenarokomov K.A. Noncontact diagnostics of rubber-like materials by methods of nonlinear acoustics // AIP Conference Proceedings, 2008, N 1022, pp. 533-536.

### **Публикации в изданиях, рекомендованных перечнем ВАК РФ**

2. Алифанов О.М., Ненарокомов А.В., Ненарокомов К.А., Титов Д.М. Параметрическая идентификация нелинейных математических моделей распространения продольных волн в материалах.- Вестник МАИ, 2013, том 20, №5, С. 185-195.

3. Алифанов О.М., Ненарокомов А.В., Ненарокомов К.А., Терентьева А.В., Титов Д.М. Конечно-разностный метод решения обобщенной краевой задачи для уравнения гиперболического типа в многослойной области.- Вестник МАИ, 2013, том 20, №5, С. 196-206.

4. Алифанов О.М., Ненарокомов А.В., Ненарокомов К.А., Титов Д.М., Финченко В. С. Неразрушающая дефектоскопия материалов гибкой тепловой защиты методами нелинейной акустики // Тепловые процессы в технике, 2016, том 8, № 8, С.369-377.

### **Публикации в других научных изданиях**

5. Коробов А.И., Ненарокомов К.А. Экспериментальная установка и методика для нелинейной акустической вибродиагностики. В сборнике трудов 19 сессии Российского акустического общества. Том 2. (Н.Новгород, 24-28 сентября 2007).- М.: изд-во ООО «Геос», с. 53-56.

6. Ненарокомов К.А. Экспериментальная установка и методика для нелинейной акустической вибродиагностики // Международная конференция молодых учёных “Ломоносов-2007”, секция “Физика”, с.171.

7. Alifanov O.M., Korobov A.I., Nenarokomov K.A. Noncontact Diagnostics of Elastic Materials by Inverse Methods of Nonlinear Acoustics // Proceedings of Waves 2009, the 9<sup>th</sup> conference on mathematical and numerical aspects of waves propagation, INRIA, Pau, France, 2009, pp. 316-318.

8. Alifanov O.M., Nenarokomov A.V., Nenarokomov K.A. Non-Contact Parameter Estimation of Elastic Materials by Inverse Methods of Nonlinear Acoustics // Proceedings of 2nd African Conference on Computational Mechanics (January 2011), Uok Publ., 2011, 4p.

9. Alifanov O.M., Nenarokomov A.V., Nenarokomov K.A. Non-Contact Testing of Elastic Materials by Inverse Methods of Nonlinear Acoustics // Proceedings of 7th International Conference on Inverse Problems in Engineering: Theory and Practice (May 4 – 6, 2011, Orlando, Florida, USA).- University of Central Florida Publ., 2011, 6p.

10. Alifanov O.M., Nenarokomov A.V., Nenarokomov K.A., Terentieva A.V., Titov D.V., Finchenko V.S. Experimental-computational system for noncontact diagnostics of elastic materials // Proceedings of 8th International Conference on Inverse Problems in Engineering (May 12–15, 2014, Poland).- Silesian TU Publ., Gliwice-Wrocław, Poland, 2014, pp. 13-22.