

**МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ
ДОНЕЦКОЙ НАРОДНОЙ РЕСПУБЛИКИ
ГОСУДАРСТВЕННОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ
ВЫСШЕГО ПРОФЕССИОНАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ
«ДОНБАССКАЯ НАЦИОНАЛЬНАЯ АКАДЕМИЯ
СТРОИТЕЛЬСТВА И АРХИТЕКТУРЫ»**

На правах рукописи



Сторожев Сергей Валериевич

**НЕЧЕТКО-МНОЖЕСТВЕННЫЕ МЕТОДЫ УЧЕТА ФАКТОРОВ
НЕОПРЕДЕЛЕННОСТИ В МАТЕМАТИЧЕСКИХ МОДЕЛЯХ
ДЕФОРМАЦИОННЫХ И ТЕПЛОВЫХ ПРОЦЕССОВ**

Специальность 05.13.18 – Математическое моделирование,
численные методы и комплексы программ
(технические науки)

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
доктора технических наук

Макеевка – 2021

Работа выполнена в Государственном образовательном учреждении высшего профессионального образования «Донбасская национальная академия строительства и архитектуры» Министерства образования и науки Донецкой Народной Республики (г. Макеевка).

Научный консультант: доктор технических наук, профессор
Павлыш Владимир Николаевич,
ГОУВПО «ДОННТУ» (г. Донецк), заведующий
кафедрой «Прикладная математика»

**Официальные
оппоненты:** **Карабутов Николай Николаевич**, доктор
технических наук, профессор, Институт
искусственного интеллекта Российского
технологического университета МИРЭА (г.
Москва), профессор кафедры проблем
управления

Кравец Олег Яковлевич, доктор технических
наук, профессор, ФГБОУ ВО «Воронежский
государственный технический университет» (г.
Воронеж), профессор кафедры
автоматизированных и вычислительных систем

Провоторов Вячеслав Васильевич, доктор
физико-математических наук, доцент, ФГБОУ
ВО «Воронежский государственный
университет» (г. Воронеж), профессор кафедры
уравнений в частных производных и теории
вероятностей

Ведущая организация: **Федеральное государственное бюджетное
учреждение науки «Институт машиноведения
им. А.А. Благонравова Российской академии
наук»** (г. Москва)

Защита состоится «27» сентября 2022 г. в 12:00 часов на заседании диссертационного совета Д 01.024.04 при ГОУВПО «ДОННТУ» и ГОУВПО «ДОННУ» по адресу: 283001, г. Донецк, ул. Артёма, 58, 1 уч. корпус, ауд. 1.203. Тел./факс +38(062)3043055, E-mail: uchensovets@donntu.ru

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ГОУВПО «ДОННТУ» по адресу: 283001, г. Донецк, ул. Артёма, 58, 1 уч. корпус
Адрес сайта университета: <http://donntu.ru>

Автореферат разослан « » _____ 2022 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета Д 01.024.04
кандидат технических наук, доцент



Т.В. Завадская

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. Математические модели деформационных и термических процессов относятся к числу широко распространенных в технических и естественных науках. Их разработка и исследование на основе алгоритмизированных численно-аналитических методов связаны с определением характеристик прочности, надежности и долговечности конструктивных элементов машин, приборов, строительных и подземных сооружений, с обеспечением режимов термостабилизации в технологических процессах. Важную роль модели данного типа играют в проектно-конструкторских работах для таких современных высокотехнологичных отраслей, как создание аэрокосмической техники, термоядерная энергетика, акустоэлектроника, гео- и гидроакустика, ультразвуковая дефектоскопия, аддитивные технологии. При этом к числу ключевых заданий в совершенствовании приемов формализации и методов исследования моделей деформационных и термических процессов относится учет влияния факторов неопределенности различной природы, неизбежно сопутствующих математическому описанию реальности. В первую очередь это разбросы экзогенных физико-механических и геометрических параметров моделей, обусловленные погрешностями и усреднениями данных экспериментальных измерений и экспертных оценок, вариациями рабочих параметров в пределах технологических допусков и иными факторами.

Преимущественно используемым в этом случае подходом сегодня является применение методов вероятностного стохастического анализа. Обширный круг математических моделей деформационных и термических процессов имеют вероятностно-стохастические обобщения, однако для доминирующего числа соответствующих задач подобные эффективные обобщения на сегодняшний день не построены. Наряду со сложностью разработки вероятностно-стохастических версий рассматриваемых моделей, их практическое применение сопряжено с необходимостью оперирования исходной информацией, отвечающей требованиям корректности ее статистической природы, прежде всего получению ее на основе однородных частотных выборок достаточной мощности, что не всегда достижимо на практике. При моделировании неопределенных параметров вероятностные методы предполагают также априорное задание законов распределения результатов, что является условным допущением и влияет на точность получаемых оценок и степень их соответствия реальным объектам. Помимо этого, в современных условиях реализации методов стохастического анализа, количество доступных одновременно учету случайных факторов в моделях деформационных и тепловых процессов, как правило, не превышает трех. Как следствие, состояние разработок в области применения вероятностного статистического подхода для анализа факторов неопределенности в моделях рассматриваемого типа существенно отстает от реальных прикладных запросов

соответствующих научно-технических отраслей. В этой связи, представляет независимый интерес развитие сопутствующих концептуальных подходов к учету факторов неопределенности в математических моделях деформационных и термических процессов с дополнительными возможностями и расширенными перспективами их применения к различным новым классам рассматриваемых моделей, а также с менее строгими требованиями к характеру исходной информации, включая возможности использования данных, полученных на основе субъективных экспертных заключений. Такие возможности для учета факторов неопределенности исходных параметров в математических моделях деформационных и термических процессов открывает применение методов теории нечетких множеств, как на этапе формализации неконтрастных исходных данных, так и в процессе оперирования с соответствующей неопределенной информацией, вплоть до получения оценок для разбросов эндогенных параметров исследуемых моделей. Правомерность оценки перспектив применения нечетко-множественных подходов к анализу указанных типов математических моделей подтверждается опытом их использования при анализе различных аспектов функционирования технических систем.

Таким образом, научное обоснование, развитие и алгоритмизация методов, базирующихся на положениях теории нечетких множеств, для исследования факторов неопределенности при анализе широкого круга математических моделей деформационных и тепловых процессов представляет собой современную актуальную научно-техническую проблему.

Связь работы с научными программами, планами, темами. Исследования по теме диссертации выполнялись в рамках НИР ГОУ ВПО ДонНАСА «К-2-03-16 «Предложения по дальнейшему развитию математических моделей механики абсолютно твердого и деформируемого твердого тела, физических явлений в кристаллах; решению задач теории детерминированных и стохастических дифференциальных уравнений и их систем; применению информационных технологий» (2016-2020 гг.), «Математическое и компьютерное моделирование многофакторных процессов и явлений» (2021-2025 гг.). Представленные в работе исследования связаны также с тематикой конкурсных исследовательских проектов: «Волны деформаций в анизотропных телах с локализованными участками неоднородности геометрических и физико-механических свойств» (МОНУ, МОН ДНР, номер гос. регистрации 0113U001529, 2013-2016 гг.); «Математическое моделирование прочностных и волноводных свойств деформируемых элементов конструкций и геоструктур с усложненными физико-механическими свойствами» (МОН ДНР, номер гос. регистрации 0117D000071, 2017-2019 гг.); «Методы исследования линейных и нелинейных моделей статического и динамического деформирования анизотропных функционально-градиентных упругих тел» (МОН ДНР, номер гос. регистрации 0120D000014, 2020-2022 гг.). Ведущие результаты диссертационной работы включены в отчеты по указанным НИР.

Степень разработанности темы исследования. В контексте общей проблемы учета факторов неопределенности в расчетных математических моделях технических систем, применение методов вероятностного стохастического анализа деформационных и термических процессов представлено циклом исследований, выполненных в период с пятидесятих годов минувшего столетия до сегодняшнего дня. Их основные результаты при исследовании моделей прочности и надежности элементов конструкций машин и строительных сооружений отражены в работах Б.С. Берковского, В.В. Болотина, В.А. Ломакина, В.Ф. Мущанова, В.А. Пальмова, Т.Д. Шермергора, М. Ostoja-Starzewski, S.Torquato, I.I. Zohdi и других исследователей. Они, прежде всего, касаются вопросов учета в рассматриваемых моделях режимов случайных внешних воздействий, стохастической неоднородности свойств деформируемых тел и конструкционных материалов, а также факторов случайной неровности граничных поверхностей. Однако спектр реализованных при этом разработок, в силу указанных причин, на данный момент не охватывает многие актуальные запросы практики предпроектного конструкторского моделирования и перспективных фундаментальных исследований.

Применение методов теории нечетких множеств (нечетких вычислений, нечеткой логики) в технических науках, в том числе и в исследованиях отдельных инженерных моделей механики и термодинамики, получило свое развитие преимущественно в течение двух последних десятилетий. Ключевые вопросы применения аппарата теории нечеткой математики в этих исследованиях отражены в работах А.Е. Алтунина, Н.В. Дилигенского, Д. Дюбуа, А. Прада, М.В Семухина, G.A. Anastassiou, L.C. Coroianu, M. Gupta, M. Hanss, J. Harris, W.B.V. Kandasamy, A.H. Sonbol, H.S. Tzou и ряда других ученых. Исследованиям по отдельным вопросам применения теории нечетких множеств при разработке моделей нечеткой пластичности, анализе модели циклического поведения рыхлого песка, посвящены работы Y. Bao, C. Chen, Z. Liu, S. Sture, M. Wójcik, C. Zhang. В публикациях Н.Л. Галаевой, А.А. Asrari, Н. Basarir, S. Can, F. Demir, Н. Lee, M.Z.A. Majid, F. Özcan, A. Skrzat, G. Tayfur изложены отдельные вопросы нечетко-множественного прогнозирования деформационных и прочностных параметров металлических конструкций, горных пород и бетонов. Таким образом, методы теории нечетких множеств, как инструмент учета факторов неопределенности в прикладном математическом моделировании, имеют расширяющийся круг эффективных применений.

Однако реализованные на данный момент исследования не охватывают имеющие важнейшее практическое значение актуальные аспекты проблемы учета факторов разброса исходных параметров для широкого класса моделей динамического деформирования и устойчивости тонкостенных конструкций, моделей концентрации напряжений и пластических деформаций около полостей, отверстий и включений в пластинах и геомассивах; в моделях теории

объемных, поверхностных и нормальных упругих волн; в моделях резонансно-волновой идентификации физико-механических и геометрических параметров пластин и цилиндров; в моделях расчета параметров гидроакустических экранов; в моделях рассеяния охлаждающих жидкостей и обтекания газожидкостными потоками в технических системах термостабилизации; в расчетных моделях тепловых экранов и ряде других моделей рассматриваемого типа. Актуальную, практически значимую задачу развития методов нечетко-множественного учета факторов неопределенности в моделях прочностных и термических предпроектных расчетов для широкого круга технических систем решают исследования, осуществляемые в представленной диссертационной работе.

Цель и задачи исследования. Целью диссертационной работы является развитие теоретических основ нечетко-множественных численно-аналитических методов и разработка алгоритмов исследования математических моделей деформационных и тепловых процессов с учетом факторов неопределенности экзогенных параметров, как инструмента повышения эффективности проектных конструкторских расчетов для ряда промышленных отраслей и современных высокотехнологичных производств.

Для достижения цели поставлены и решены следующие основные задачи:

– разработана концепция теоретического анализа моделей деформационных и термических процессов с неконтрастными, обладающими разбросами значений параметрами на основе расширения областей определения расчетных соотношений детерминистических версий соответствующих моделей на аргументы нечетко-множественных типов с фрагментированным поэтапным применением аппарата нечетких вычислений и модифицированной альфа-уровневой версии эвристического принципа обобщения;

– осуществлена разработка и алгоритмизация нечетко-множественных методов исследования моделей устойчивости, динамического и статического деформирования для тонкостенных конструкций с неопределенными экзогенными параметрами;

– созданы нечетко-множественные алгоритмизированные методы учета неопределенности исходных параметров в задачах концентрации напряжений и пластических деформаций около полостей, отверстий и включений в геомассивах и конструкциях в виде тонких плит и пластин;

– даны развитие и программная реализация методов теории нечетких множеств применительно к исследованию прямых и обратных задач моделирования резонансных упругих колебаний упругих пластин, панелей и цилиндров с неконтрастными экзогенными характеристиками;

– осуществлена разработка и алгоритмизация нечетко-множественных методов учета факторов неопределенности в моделях распространения и рассеяния объемных, поверхностных и нормальных волн деформаций в конструкциях из упругих, электроупругих и магнитоупругих материалов;

– предложены и программно реализованы нечетко-множественные методы расчета и резонансно-волновой идентификации неконтрастных физико-механических свойств многокомпонентных деформируемых сред, композиционных и кристаллических конструкционных материалов;

– разработаны и программно реализованы нечетко-множественные методы расчета параметров гидроакустических экранов из компонентов с неконтрастными физико-механическими и геометрическим свойствами;

– предложены алгоритмизированные методы нечетко-множественного учета факторов неопределенности в моделях рассеяния жидкостей в технических системах жидкостно-капельного охлаждения;

– разработаны алгоритмизированные нечетко-множественные методы учета факторов неопределенности в моделях термостабилизации обтекающими газожидкостными потоками;

– дана разработка и алгоритмизация нечетко-множественных подходов к учету факторов неопределенности в расчетных моделях тепловых экранов;

– осуществлено сопоставление результатов применения аппарата нечетко-множественного и вероятностно-стохастического анализа при исследовании отдельных моделей рассматриваемого типа.

Объектом исследования являются деформационные и термические процессы в конструкциях проектируемых и эксплуатируемых технических систем.

Предметом исследования являются эффекты влияния неопределенности, связанной с наличием разбросов в значениях физико-механических и геометрических экзогенных параметров расчетных математических моделей деформационных и тепловых процессов в технических системах, на эндогенные характеристики указанных моделей.

На защиту выносятся следующие научные положения и результаты диссертационной работы:

1 Получение в предпроектном математическом моделировании уточненных оценок для ресурсов прочности, надежности и долговечности конструкционных элементов технических систем с учетом эффектов потери устойчивости, резонансных колебаний и волнового деформирования при описании разбросов исходных физико-механических характеристик моделей маломощными частотными выборками экспериментальных данных и субъективными экспертными оценками, эффективно реализуется алгоритмизированными методами теории нечетких множеств путем фаззификации неопределенных исходных параметров и расширения областей определения расчетных соотношений детерминистических версий соответствующих моделей на аргументы нечетко-множественного типа с фрагментированным поэтапным применением аппарата нечеткой арифметики и альфа-уровневой версии эвристического принципа обобщения.

2. В предпроектных расчетах с использованием аналитических математических моделей концентрации механических напряжений и

формирования зон пластических деформаций около отверстий и включений, туннельных полостей в геомассивах, повышение адекватности оценок запасов прочности и показателей надежности при учете разбросов в значениях экзогенных физико-механических и геометрических параметров моделей, может достигаться на основе применения нечетко-множественных методов с получением эндогенных параметров в форме, описывающей показатели уверенности в достижении этими параметрами значений из интервалов носителей определяемых множеств.

3. Реализованное применение методов теории нечетких множеств для анализа обратных задач динамического деформирования тонкостенных конструктивных элементов технических устройств и подземных горно-шахтных сооружений, является эффективным инструментом решения проблемы резонансно-волновой идентификации их параметров по обладающим разбросами данным ультразвуковой диагностики и позволяет получать для идентифицируемых параметров описания в виде нечетких величин с устанавливаемыми функциями принадлежности.

4. В математических моделях теплового экранирования и функционирования устройств распыления охлаждающих жидкостей в технических системах термостабилизации при наличии разбросов опытных и экспертных данных о характеристиках конструктивных материалов, жидкостей и газов, оценки неконтрастных эндогенных характеристик экранов, а также факелов, скоростей и показателей дисперсности аэрозольных потоков, эффективно описываются нечетко-множественными величинами на основе фаззификации неопределенных исходных параметров и применения эвристического принципа расширения к расчетным соотношениям детерминистических версий моделей.

Научная новизна работы в контексте представленных целей заключается в следующем:

1. Впервые разработаны специализированные методы и вычислительные алгоритмы нечетко-множественного исследования моделей резонансных колебаний, распространения волн деформаций и потери устойчивости для тонкостенных стержневых, пластинчатых и оболочечных конструкций с неопределенными параметрами, что позволяет повысить корректность предпроектных конструкторских расчетов по определению ресурсов прочности, надежности и функциональности конструктивных элементов данного типа в машинах, приборах и строительных сооружениях.

2. Впервые на основе разработки и алгоритмизации специализированных нечетко-множественных методов осуществлен анализ моделей концентрации напряжений и возникновения зон пластических деформаций около полостей, отверстий и включений в пластинчатых конструкциях и геомассивах с учетом факторов разброса исходных физико-механических и геометрических параметров, что позволяет усовершенствовать методологии конструирования многосвязных строительных деталей, корпусов и несущих конструкций машин,

печатных плат электронных устройств, объектов аэрокосмической техники и проектирования горных сооружений с выработками и транспортными туннелями путем выработки более обоснованных рекомендаций по выбору рабочих параметров, обеспечивающих требования к надежности и механической прочности указанных конструкций и сооружений.

3. Впервые предложены и реализованы специализированные методы нечетко-множественного исследования моделей распространения, дисперсии и трансформации объемных, поверхностных и нормальных волн упругих, электроупругих и магнитоупругих деформаций при учете разбросов значений экзогенных параметров моделирования, что решает задачу повышения уровня корректности и практической ценности оценок сейсמודинамических и геоакустических прогнозов и измерений, является средством повышения точности конструкторских расчетов для акустоэлектронных радиокомпонентов в виде линий задержки и фильтров на поверхностных акустических волнах, адекватности оценок вибрационной прочности конструкций машин, строительных и горно-шахтных сооружений.

4. Впервые осуществлены разработка и алгоритмизация моделей нечетко-множественной резонансно-волновой идентификации неконтрастных механических характеристик тонких изотропных плит и нанокompозитных функционально-градиентных пластин-резонаторов с использованием данных ультразвуковой диагностики, что в качестве элемента методики обработки ее результатов обеспечивает повышение степени соответствия результатов экспериментальных исследований реальным свойствам исследуемых объектов.

5. Впервые предложены алгоритмизированные нечетко-множественные методы анализа моделей функционирования плоских гидроакустических экранов при учете неопределенности исходных данных о физико-механических и геометрических параметрах их компонентов, что позволяет при конструировании и выборе материалов для изготовления экранов добиваться необходимой степени стабильности показателей интенсивности отраженных и генерируемых в заэкранном пространстве волновых сигналов.

6. Впервые дана разработка специализированных нечетко-множественных методов анализа моделей создания аэрозольных потоков в технических системах жидкостно-капельного охлаждения при учете неопределенности конструктивных характеристик устройств распыления и параметров рассеиваемой жидкости, благодаря чему обеспечивается совершенствование технологических режимов термостабилизации с применением двухкомпонентных газожидкостных смесей в технических системах широкого спектра назначения.

7. Впервые предложены нечетко-множественные модификации методов учета факторов неопределенности в моделях термостабилизации высокотемпературных поверхностей технических конструкций обтекающими газожидкостными потоками, применение которых позволяет формировать более адекватные инженерной практике рекомендации по выбору режимов

охлаждения потоками аэрозолей, параметров дисперсности и скоростей обтекания.

8. Впервые разработаны методы и алгоритмы нечетко-множественного анализа расчетных моделей многослойных тепловых экранов с неопределенными конструктивными характеристиками отражающих элементов, применение которых позволяет получить более адекватные реальным эксплуатационным условиям параметры экранирования тепловых излучений в технических системах с применением пакетов тонких мембранных отражателей.

Методы исследования. В реализуемых исследованиях применяются строгие апробированные методы теории нечетких множеств, включая методы фаззификации и нечетко-множественной интерпретации экзогенных параметров моделей с разбросами значений, приемы расширения областей определения функциональных соотношений детерминистических версий прикладных моделей деформационных и термических процессов на аргументы нечетко-множественных типов в рамках применений модифицированной альфа-уровневой формы эвристического принципа обобщения; апробированные математические методы алгебры, теории дифференциальных уравнений и уравнений математической физики; методы разработки прикладных программных приложений в среде Mathematica Wolfram Research.

Достоверность полученных в диссертации результатов, сформулированных положений и выводов подтверждается: использованием в исследованиях результатов анализа апробированных детерминистических версий моделей деформационных и термических процессов; корректным использованием в качестве методологической базы исследования строгих обоснованных математических методов, включая апробированные методы теории нечетких множеств; согласованностью отдельных получаемых результатов с представленными в научной литературе частными результатами других исследований, осуществленных на базе детерминистических и вероятностных моделей, а также с опытными экспериментальными данными; верификацией разрабатываемых теоретических нечетко-множественных алгоритмов и создаваемых для их компьютерной реализации программных приложений; соответствием между полученными научными результатами и отраженными в документах по внедрению данными об их практическом использовании.

Теоретическая значимость результатов работы заключается в создании специализированных теоретически обоснованных эффективных численно-аналитических нечетко-множественных методов для решения новых классов научных задач моделирования деформационных и термических процессов с учетом факторов неопределенности экзогенных параметров, что отвечает логике внутринаучного развития фундаментальных исследований в области теории математического моделирования.

Практическое значение результатов работы заключается в применимости разработанных методов, алгоритмов и программных приложений, полученных выводов и установленных закономерностей, для повышения достоверности данных предпроектных конструкторских расчетов по определению ресурсов прочности, надежности и функциональности конструктивных элементов машин, приборов и строительных сооружений, а также достижения большей адекватности расчетов технологических режимов и конструктивных параметров устройств термостабилизации в условиях недостатка статистической информации при ограниченности выборок опытных данных. Разработанные методы применимы в конструкторских расчетах деталей строительных сооружений, корпусов и несущих конструкций машин, приборных панелей и плат электронных устройств, при проектировании горных сооружений с выработками и транспортными туннелями. Они позволяют решить задачу повышения корректности и практической ценности оценок сейсמודинамических и геоакустических прогнозов и измерений, являются средством повышения точности конструкторских расчетов для акустоэлектронных радиокомпонентов, обеспечивают повышение степени соответствия результатов ультразвуковой волновой диагностики характеристик материалов и элементов конструкций реальным свойствам объектов исследования.

Результаты работы, в частности нечетко-множественные оценки в моделях теории ультразвуковых волн в пьезоактивных средах, оценки для скоростей электроупругих поверхностных волн и характеристик нормальных ультразвуковых волн в однослойных и двухслойных волноводах; методики анализа моделей нечеткой идентификации механических параметров нанокompозитных функционально-градиентных резонаторов с использованием данных ультразвуковой диагностики; нечетко-множественные подходы в расчетах тепловых экранов получили практическое применение в поисковых и проектных разработках Ордена Трудового Красного Знамени АО «Научно-исследовательский институт вычислительных комплексов им. М.А. Карцева», г. Москва (справка о внедрении № 404–01 от 23.11.2021 г., подписана генеральным директором АО «НИИВК им. М.А. Карцева» А.В. Горшковым); получили практическое применение в проектных разработках ГУ «Республиканский академический научно-исследовательский и проектно-конструкторский институт горной геологии, геомеханики, геофизики и маркшейдерского дела (РАНИМИ)» МОН ДНР (г. Донецк) в качестве инструментов повышения достоверности данных о строении и свойствах геомассивов, горных пород и подземных горно-шахтных сооружений на основе технологий анализа результатов сейсмоакустических исследований и шахтной пластовой сейсμοдиагностики (справка о внедрении № 04.02–07/381 от 19.11.2021 г, подписана директором ГУ РАНИМИ д-ром техн. наук, проф. А.В. Анциферовым). Результаты диссертационного исследования внедрены в учебный процесс по направлению подготовки 27.03.03 «Системный анализ и

управление» в ГОУ ВПО ДонНУ (справка о внедрении № 6877/01-27/01.1 от 15.11.2021 г., подписана проректором ГОУ ВПО ДонНУ проф. Е.И. Скафой). Копии документов, подтверждающих практическое использование полученных результатов, представлены в Приложении А к диссертации.

Апробация результатов работы. Основные положения диссертации докладывались и обсуждались на 27 Международных научных и научно-технических конференциях, в том числе на X, XI, XII, XIII, XIV Всероссийских школах-семинарах «Математическое моделирование и биомеханика в современном университете» (пос. Дивноморское, ЮФУ: 25-30 мая 2015 г., 23-27 мая 2016 г., 29 мая-3 июня 2017 г., 28 мая-1 июня 2018 г., 27-31 мая 2019 г.); International scientific school «Paradigma» (Summer-2015, Varna, Bulgaria); XVIII Международной конференции «Современные проблемы механики сплошной среды» (Ростов-на-Дону, ЮФУ, 7-10 ноября 2016 г.); I, III, IV, V, VI Международных научных конференциях «Донецкие чтения: образование, наука, инновации, культура и вызовы современности» (Донецк, ДонНУ, 16-18 мая 2016 г., 25 октября 2018 г.; 31 октября 2019 г., 18 ноября 2020 г., 26-27 октября 2021 г.); International Scientific Workshop «Advanced technologies in material science, mechanical and automation engineering» (Yelm, WA, USA, 2019); II International Conference «MIP: Engineering-2020: modernization, innovations, progress: advanced technologies in material science, mechanical and automation engineering» (Krasnoyarsk, Apr. 16-18, 2020); II & III International Scientific Conference on Applied Physics, Information Technologies and Engineering, (Krasnoyarsk, 25 Sept.-4 Oct. 2020, 24 Sept.-3 Oct. 2021); IX Международном научном симпозиуме «Проблемы прочности, пластичности и устойчивости в механике деформируемого твердого тела» (Тверь, 15-17 декабря 2020 г.) и др., а также на научных семинарах в ГОУ ВПО ДонНАСА, (г. Макеевка, 2017-2021 гг.); ГОУ ВПО ДонНТУ (г. Донецк, 2021 г.); ГОУ ВПО ДонНУ (г. Донецк, 2021 г.); ГУ РАНМИ (г. Донецк, 2021 г.).

Публикации. По теме диссертации опубликованы 44 научные работы, в числе которых 13 статей в научно-технических журналах, включенных в перечни ВАК ДНР и ВАК РФ; 14 статей в изданиях, представленных в НБД Web of Science, Scopus, MathSciNet; 1 монография, а также 16 публикаций в других изданиях. Список из 35 основных публикаций приведен в автореферате.

Соответствие темы и содержания диссертации паспорту научной специальности. Полученные результаты, положения и выводы диссертации отвечают позициям Паспорта специальности 05.13.18 – Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ (технические науки), в том числе областям исследований п.1 «Разработка новых математических моделей и методов компьютерного моделирования явлений, объектов, систем и процессов», п.2 «Развитие качественных и приближенных аналитических методов исследования математических моделей», п.4 «Реализация эффективных численных методов и алгоритмов в виде комплексов проблемно-ориентированных программ для проведения вычислительных

экспериментов», п.5 «Комплексные исследования научных и технических проблем с применением современных технологий математического моделирования и вычислительного эксперимента».

Объем и структура диссертации. Диссертационная работа состоит из введения, 6 разделов, заключения, списка литературы из 356 наименований и двух приложений. Работа содержит 12 таблиц, 268 рисунков. Общий объем диссертационной работы составляет 444 страницы.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении дано обоснование актуальности рассматриваемой проблемы, сформулированы цели и задачи исследования, представлена характеристика основных научных положений и результатов работы, а также их практической ценности и данных апробации.

В первом разделе работы представлены анализ состояния и перспективные задания исследований по проблемам учета факторов неопределенности в математических моделях деформационных и тепловых процессов. Дана характеристика подходов к учету факторов неопределенности в исследованиях по техническим и естественным наукам, выполнен обзор опубликованных работ по рассматриваемой проблематике, изложена концепция и дано описание методологических основ использования нечетко-множественного подхода для учета факторов неопределенности в математических моделях рассматриваемого типа, а также охарактеризованы особенности применения аппарата теории нечетких множеств для их исследования. Представлена концепция использования теории нечетких вычислений для учета факторов разброса исходных параметров в моделях деформирования упругих тел и конструкционных элементов, а также в моделях функционирования и оптимизации технических систем термостабилизации путем расширения областей определения расчетных соотношений детерминистических версий соответствующих моделей на аргументы нечетко-множественных типов с фрагментированным поэтапным применением аппарата нечеткой арифметики и модифицированной альфа-уровневой версии эвристического принципа обобщения. Дана характеристика этапа компьютерной алгоритмизации разрабатываемых специализированных нечетко-множественных методов.

Второй раздел диссертации посвящен разработке нечетко-множественного подхода к исследованию моделей деформирования и устойчивости тонкостенных конструкций с неконтрастными исходными параметрами. В п. 2.1 представлен метод получения оценок нечеткости для собственных частот поперечных колебаний стержневых конструкций с экспериментальными и технологическими разбросами значений исходных параметров. Базовыми являются соотношения для собственных частот $\omega_n = F(E, J, m, l, \zeta_n) = (EJ / m)^{1/2} (\zeta_n / l)^2$ прямых стержней. Для параметров с

разбросами вводятся описания нормальными выпуклыми нечеткими множествами $\tilde{E}, \tilde{\rho}, \dots, \tilde{l}$, и с учетом статистических либо экспертных данных задаются формы функций принадлежности $\mu_{\tilde{E}}(E), \dots, \mu_{\tilde{l}}(l)$. Введенные нечетко-множественные величины записываются в форме суперпозиций интервалов α -уровня $\tilde{D}(d) = \bigcup_{\alpha \in [0,1]} [\underline{d}_\alpha, \bar{d}_\alpha]$. При задании $\tilde{D}(d)$ нечеткими гауссовыми числами $\mu_{\tilde{D}}(d) = \exp(-(d - m_*)^2 / (2\sigma_*^2))$, $\underline{d}_\alpha = m_* + 2\sigma_*^2 \ln \alpha$, $\bar{d}_\alpha = m_* - 2\sigma_*^2 \ln \alpha$; при описании $\tilde{D}(d)$ нормальным нечетким трапецеидальным интервалом с кортежем реперных значений $\tilde{D}:(d_1, d_2, d_3, d_4)$, частным случаем которого ($d_2 = d_3$) является треугольное нечеткое число, $\underline{d}_\alpha = d_1(1-\alpha) + d_2\alpha$, $\bar{d}_\alpha = d_4(1-\alpha) + d_3\alpha$. Для эндогенных нечетко-множественных характеристик $\tilde{\omega}_n$ с применением модифицированного эвристического принципа расширения записываются представления $\tilde{\omega}_n = \bigcup_{\alpha \in [0,1]} [\underline{\omega}_{n\alpha}, \bar{\omega}_{n\alpha}]$, в которых для частного случая стержней прямоугольного сечения $a \cdot b$ с учетом оценок $\partial \omega_n(E, \rho, a, b, l) / \partial E \geq 0$, $\dots, \partial \omega_n(E, \rho, a, b, l) / \partial l \leq 0$ и при задании исходных параметров нечеткими гауссовыми числами

$$\underline{\omega}_{n\alpha} = ((m_a + 2\sigma_a^2 \ln \alpha) / 2) ((m_E + 2\sigma_E^2 \ln \alpha) / (3(m_\rho - 2\sigma_\rho^2 \ln \alpha)))^{1/2} (\zeta_n^2 / (m_l - 2\sigma_l^2 \ln \alpha)^2),$$

$$\bar{\omega}_{n\alpha} = ((m_a - 2\sigma_a^2 \ln \alpha) / 2) ((m_E - 2\sigma_E^2 \ln \alpha) / (3(m_\rho + 2\sigma_\rho^2 \ln \alpha)))^{1/2} (\zeta_n^2 / (m_l + 2\sigma_l^2 \ln \alpha)^2).$$

Представленный на рисунке 1 пример расчетов функции принадлежности для нечетко-множественной собственной частоты консольного стержня кругового сечения описывает показатель степени уверенности в достижении эндогенным параметром соответствующих значений из интервала носителя $\tilde{\omega}_n$ при заданных неконтрастных параметрах.

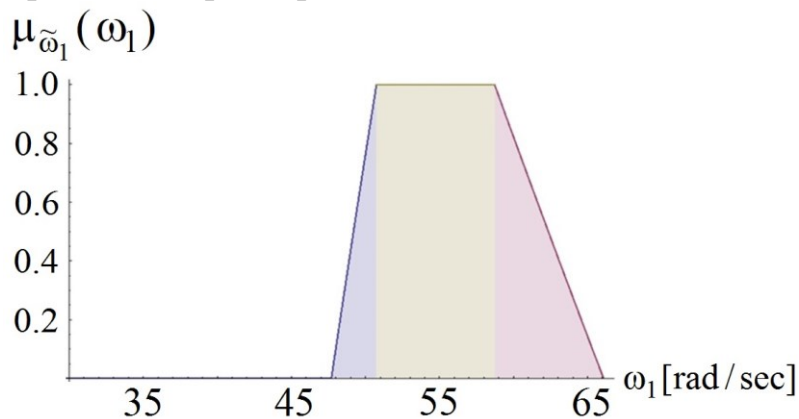


Рисунок 1 – Вид $\mu_{\tilde{\omega}_1}(\omega_1)$

Далее дана разработка нечетко-множественного метода анализа прикладной модели устойчивости стержней с неконтрастными параметрами на основе использования представлений для критических значений сжимающих усилий $P_* = \Phi(E, l, I_{\min}) = EI_{\min} \pi^2 (\eta l^2)^{-1}$, где F – площадь сечения, l – длина; I_{\min} – минимальный изгибный момент инерции сечения; η – параметр граничных условий. Соотношения метода получены для стержней с несколькими формами

поперечных сечений. При введении для исходных параметров нечетко-интервальных представлений $\tilde{E} = (E_1, E_2, E_3, E_4) = \bigcup_{\alpha \in [0,1]} [\underline{E}_\alpha, \bar{E}_\alpha]$, $\tilde{l} = (l_1, l_2, l_3, l_4) = \bigcup_{\alpha \in [0,1]} [\underline{l}_\alpha, \bar{l}_\alpha]$, в

частном случае стержня кольцевого сечения $R_1 < r < R_2$ для характеристики \tilde{P}_{*r} получено представление вида $\tilde{P}_{*r} = \bigcup_{\alpha \in [0,1]} [\underline{P}_{*r\alpha}, \bar{P}_{*r\alpha}]$,

$$\underline{P}_{*r\alpha} = \Phi_r(\underline{E}_\alpha, \bar{l}_\alpha, \bar{R}_{1\alpha}, \underline{R}_{2\alpha}, \eta) = \pi^3 \underline{E}_\alpha (\underline{R}_{2\alpha}^4 - \bar{R}_{1\alpha}^4) (4\eta \bar{l}_\alpha^2)^{-1}, \quad \bar{P}_{*r\alpha} = \Phi_r(\bar{E}_\alpha, \underline{l}_\alpha, \underline{R}_{1\alpha}, \bar{R}_{2\alpha}, \eta) = \pi^3 \bar{E}_\alpha (\bar{R}_{2\alpha}^4 - \underline{R}_{1\alpha}^4) (4\eta \underline{l}_\alpha^2)^{-1}.$$

Для реализации метода разработано программное приложение; проведен цикл численных исследований. Представлена разработка нечетко-множественного метода анализа фазовых скоростей V_f волн кручения в прямых стержнях с неопределенными параметрами E , ν , ρ , а также с неконтрастными полярным I_r , крутильным I_x и секториальным I_ω моментами инерции на базе использования трех вариантов уточненных теорий. Реализуется переход к нечетко-интервальным представлениям для экзогенных параметров и применение арифметики нечетких интервалов для получения $\tilde{I}_r, \tilde{I}_x, \tilde{I}_\omega$. Применительно к модели С.П. Тимошенко с использованием выражения

$$V_f = F_V(\rho, \nu, E, I_r, I_x, I_\omega, k) = (GI_x / \rho I_r)^{1/2} (1 + (EI_\omega / GI_x) k^2)^{1/2}$$

на основе эвристического принципа расширения получено представление

$$\tilde{V}_f(k) = \bigcup_{\alpha \in [0,1]} [\underline{V}_{f\alpha}(k), \bar{V}_{f\alpha}(k)],$$

$$\underline{V}_{f\alpha}(k) = \inf_{\substack{\nu \in [\underline{\nu}_\alpha, \bar{\nu}_\alpha] \\ I_x \in [\underline{I}_{x\alpha}, \bar{I}_{x\alpha}]}} \{F_V(\underline{\rho}_\alpha, \nu, \underline{E}_\alpha, \bar{I}_{r\alpha}, I_x, \underline{I}_{\omega\alpha}, k)\}, \quad \bar{V}_{f\alpha}(k) = \sup_{\substack{\nu \in [\underline{\nu}_\alpha, \bar{\nu}_\alpha] \\ I_x \in [\underline{I}_{x\alpha}, \bar{I}_{x\alpha}]}} \{F_V(\underline{\rho}_\alpha, \nu, \bar{E}_\alpha, \underline{I}_{r\alpha}, I_x, \bar{I}_{\omega\alpha}, k)\}.$$

На рисунке 2 описаны границы $\mu = 0$ носителей нечетких множеств $\tilde{V}_f(k)$ и границы $\mu = 1$ их модальных областей, включающих наиболее достоверные значения $V_f(k)$. Метод распространен и программно реализован для задач учета неконтрастности исходных параметров при анализе скоростей волн кручения в однородном изотропном стержне с учетом кинетической энергии деформации на основе уточненных теорий В.З. Власова и И.В. Сливкера.

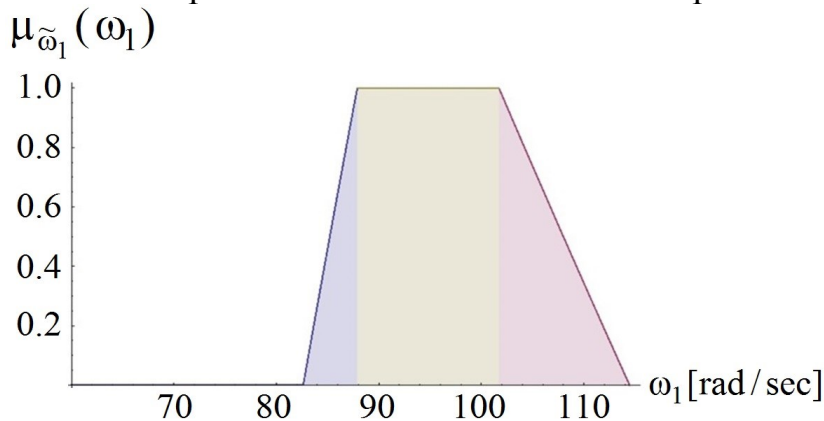


Рисунок 2 – Вид $\mu_{\tilde{\omega}_1}(\omega_1)$

Примеры блок-схем и скриншотов разрабатываемых программных модулей даны в Приложении В диссертации.

В п. 2.4 дана разработка нечетко-множественного метода учета разбросов исходных параметров в задачах осесимметричного изгиба тонких изотропных круговых и кольцевых плит с использованием точных аналитических решений в рамках детерминистических моделей. В частности, для функции прогиба закрепленной круговой плиты радиуса R под действием распределенного усилия q при переходе к нечетко-интервальным описаниям исходных параметров получено представление

$$\tilde{w}_j(r) = \bigcup_{\alpha \in [0,1]} [w_{j\alpha}(r), \bar{w}_{j\alpha}(r)], \quad w_{1\alpha}(r) = F_w^{(1)}(\bar{\nu}_\alpha, \bar{E}_\alpha, \bar{h}_\alpha, \bar{R}_\alpha, \bar{q}_\alpha, r), \quad \bar{w}_{1\alpha}(r) = F_w^{(1)}(\nu_\alpha, E_\alpha, h_\alpha, R_\alpha, q_\alpha, r),$$

где $w_1(r) = F_w^{(1)}(\nu, E, h, R, q, r) = q(64D)^{-1}(R^2 - r^2)^2$, $D = Eh^3[12(1 - \nu^2)]^{-1}$.

Соотношения метода получены также для круговых и кольцевых плит с закрепленными и шарнирно опертыми краями, нагруженных равномерными усилиями сверху, усилиями на контурах или сосредоточенными усилиями в центре. Пример описания границ носителей и модальных интервалов нечетких оценок прогибов для равномерно нагруженной шарнирно опертой круговой плиты приведен на рисунке 3. Учет разбросов исходных параметров реализован также в задаче изгиба тонких ортотропных эллиптических плит равномерными изгибающими моментами на контуре.

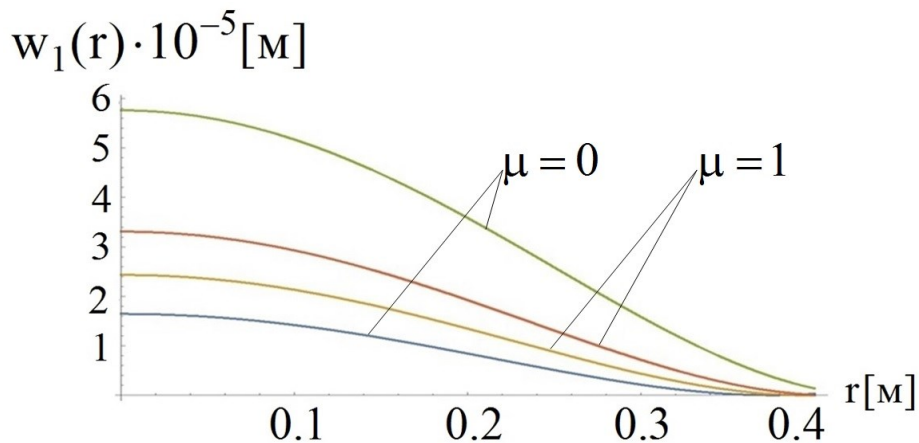


Рисунок 3 – Границы носителей и модальных интервалов для $w_1(r)$

В п. 2.5 работы разработан метод учета неопределенности для модели термоупругого деформирования эллиптических пластин из ортотропных композитных материалов с закрепленным контуром при действии линейного по толщине стационарного поля температур. Предложен также метод нечетко-множественного анализа модели концентрации термомеханических напряжений на контуре эллиптического отверстия в тонкой изотропной пластине с эндогенным параметром $\sigma_\theta = F_{\sigma_\theta}(\alpha, q, a, b, E, \beta, \theta)$ при обобщенном плоском напряженном состоянии под действием теплового потока. Для нечетко-множественной характеристики $\tilde{\sigma}_\theta(\theta)$ получено представление

$$\tilde{\sigma}_\theta(\theta) = \bigcup_{\alpha \in [0,1]} [\underline{\sigma}_{\theta\alpha}(\theta), \bar{\sigma}_{\theta\alpha}(\theta)],$$

$$\underline{\sigma}_{\theta\alpha}(\theta) = \inf_{\substack{a \in [\underline{a}_\alpha, \bar{a}_\alpha] \\ b \in [\underline{b}_\alpha, \bar{b}_\alpha] \\ \beta \in [\underline{\beta}_\alpha, \bar{\beta}_\alpha]}} \{F_{\sigma_\theta}(\underline{\alpha}_\alpha, \underline{q}_\alpha, a, b, \underline{E}_\alpha, \beta, \theta)\}, \quad \bar{\sigma}_{\theta\alpha}(\theta) = \sup_{\substack{a \in [\underline{a}_\alpha, \bar{a}_\alpha] \\ b \in [\underline{b}_\alpha, \bar{b}_\alpha] \\ \beta \in [\underline{\beta}_\alpha, \bar{\beta}_\alpha]}} \{F_{\sigma_\theta}(\bar{\alpha}_\alpha, \bar{q}_\alpha, a, b, \bar{E}_\alpha, \beta, \theta)\}.$$

Расчетные соотношения реализованы в программных приложениях, а примеры расчетов $\tilde{\sigma}_\theta(\theta)$ отражены на рисунках 4, 5.

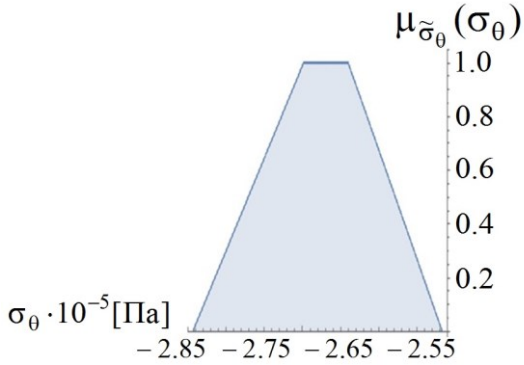


Рисунок 4 – Вид $\mu_{\tilde{\sigma}_\theta}(\sigma_\theta)$ для $\theta = \pi/2$

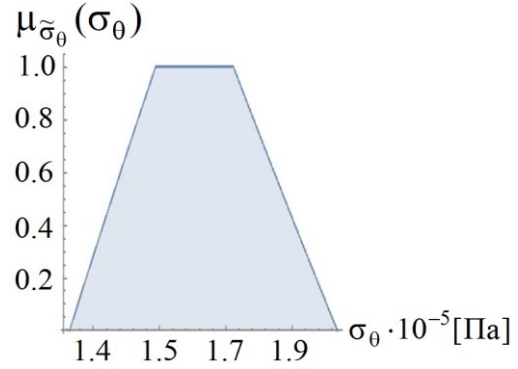


Рисунок 5 – Вид $\mu_{\tilde{\sigma}_\theta}(\sigma_\theta)$ для $\theta = \pi$

Подраздел 2.6 посвящен нечетко-множественному анализу имеющих неконтрастные параметры моделей устойчивости трехслойных изотропных пластин симметричной по толщине структуры с заполнителями пониженной жесткости в виде полосы и прямоугольных шарнирно опертых пластин при равномерном торцевом сжатии, либо сжатии по плоским граням. В частности, используются представления для критических значений приложенных к граням сжимающих усилий, вызывающих выпучивание несущих слоев с одной полуволной вдоль Ox_2

$$P_2^{**} = \Phi_3(\delta, h, E, \nu, E_q) = 4((E_q/h)E\delta^3(12(1-\nu^2))^{-1})^{1/2}.$$

На основе представления неконтрастных параметров нечеткими интервалами получены представления

$$\tilde{P}_2^{**} = \bigcup_{\alpha \in [0,1]} [P_{2\alpha}^{**}, \bar{P}_{2\alpha}^{**}], \quad P_{2\alpha}^{**} = \Phi_3(\underline{\delta}_\alpha, \underline{h}_\alpha, \underline{E}_\alpha, \underline{\nu}_\alpha, \underline{E}_{q\alpha}), \quad \bar{P}_{2\alpha}^{**} = \Phi_3(\bar{\delta}_\alpha, \bar{h}_\alpha, \bar{E}_\alpha, \bar{\nu}_\alpha, \bar{E}_{q\alpha}).$$

Пример расчетов \tilde{P}_2^{**} для пластины с несущими слоями из алюминиевого сплава D16 и заполнителем из пенопласта ПХВ-1 с применением разработанного программного приложения представлен на рисунке 6.

Разработан нечетко-множественный метод анализа моделей устойчивости тонкостенных оболочек цилиндрической, сферической, эллипсоидальной и тороидальной формы. Получены представления для нечетко-множественных оценок критического сжимающего осевого усилия q_{mn1}^* потери устойчивости с n волнами в окружном и m полуволнами в продольном направлении для цилиндрической оболочки с нечетко-интервальными радиусом \tilde{R} , длиной \tilde{L} , толщиной стенки \tilde{h} из материала с модулем Юнга \tilde{E} и коэффициентом

Пуассона $\tilde{\nu}$. В случае ее безмоментного докритического состояния и задания граничных условий шарнирного опирания ($j=1$) либо жесткого закрепления ($j=2$)

$$\tilde{q}_{mj}^* = \bigcup_{\alpha \in [0,1]} [q_{mj\alpha}^*, \bar{q}_{mj\alpha}^*]$$

$$q_{mn1\alpha}^* = \inf_{L \in [\underline{L}_\alpha, \bar{L}_\alpha]} \{F_H(\underline{h}_\alpha, \bar{R}_\alpha, L, \underline{E}_\alpha, \underline{\nu}_\alpha, m, n)\}, \quad \bar{q}_{mn1\alpha}^* = \sup_{L \in [\underline{L}_\alpha, \bar{L}_\alpha]} \{F_H(\bar{h}_\alpha, \underline{R}_\alpha, L, \bar{E}_\alpha, \bar{\nu}_\alpha, m, n)\};$$

$$q_{mn2\alpha}^* = \inf_{L \in [\underline{L}_\alpha, \bar{L}_\alpha]} \{F_R(\underline{h}_\alpha, \bar{R}_\alpha, L, \underline{E}_\alpha, \underline{\nu}_\alpha, m, n)\}, \quad \bar{q}_{mn2\alpha}^* = \sup_{L \in [\underline{L}_\alpha, \bar{L}_\alpha]} \{F_R(\bar{h}_\alpha, \underline{R}_\alpha, L, \bar{E}_\alpha, \bar{\nu}_\alpha, m, n)\}.$$

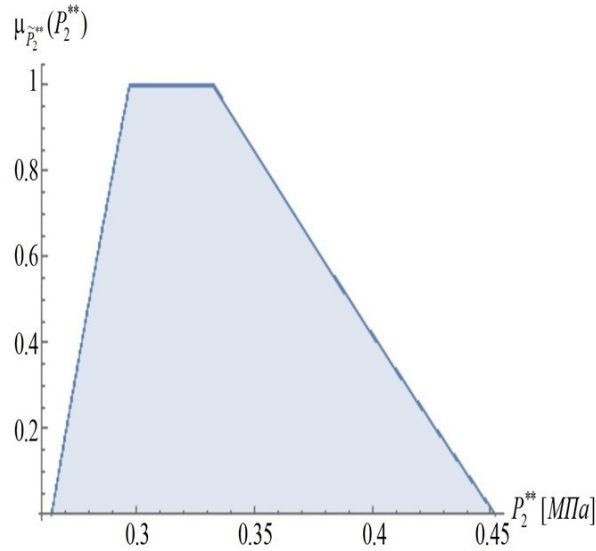


Рисунок 6 – Вид $\mu_{\tilde{P}_2^{**}}(P_2^{**})$

Рассмотрены также модели потери устойчивости цилиндрических оболочек, нагруженных внешним гидростатическим давлением и торцевыми сжимающими усилиями, в том числе деформирование оболочки с учетом больших перемещений; модели устойчивости цилиндрических оболочек в деформируемой среде либо содержащих упругое наполнение (модели устойчивости оболочек на упругом основании).

В п. 2.8 дан нечетко-множественный анализ моделей устойчивости сферической и вытянутой либо сплюсненной эллипсоидальной оболочки, а также замкнутой оболочки тороидальной формы под действием равномерного внешнего давления. Для сферической оболочки радиуса \tilde{R} , толщины \tilde{h} из материала с модулем Юнга \tilde{E} и коэффициентом Пуассона $\tilde{\nu}$, получены представления

$$\tilde{P}_j = \bigcup_{\alpha \in [0,1]} [P_{*j\alpha}, \bar{P}_{*j\alpha}] \quad (j = \overline{1,3}) \quad \underline{P}_{*1\alpha} = 2\underline{E}_\alpha \underline{h}_\alpha^2 / (\bar{R}_\alpha^2 (3(1-\underline{\nu}_\alpha^2))^{1/2}), \quad \bar{P}_{*1\alpha} = 2\bar{E}_\alpha \bar{h}_\alpha^2 / (\underline{R}_\alpha^2 (3(1-\bar{\nu}_\alpha^2))^{1/2}).$$

Для тороидальной оболочки с толщины стенки \tilde{h} , радиусом круговых сечений \tilde{R}_s трубчатой части и расстоянием \tilde{R}_l от оси симметрии до центров поперечных

сечений, оценка интенсивности критического внешнего давления имеет вид

$$\tilde{q}_n^* = \bigcup_{\alpha \in [0,1]} [q_{n\alpha}^*, \bar{q}_{n\alpha}^*],$$

$$q_{n\alpha}^* = \inf_{\substack{R_s \in [\underline{R}_{s\alpha}, \bar{R}_{s\alpha}] \\ R_l \in [\underline{R}_{l\alpha}, \bar{R}_{l\alpha}] \\ \nu \in [\underline{\nu}_\alpha, \bar{\nu}_\alpha]}} \Phi_n(\underline{h}_\alpha, R_s, R_l, \underline{E}_\alpha, \nu), \quad \bar{q}_{n\alpha}^* = \sup_{\substack{R_s \in [\underline{R}_{s\alpha}, \bar{R}_{s\alpha}] \\ R_l \in [\underline{R}_{l\alpha}, \bar{R}_{l\alpha}] \\ \nu \in [\underline{\nu}_\alpha, \bar{\nu}_\alpha]}} \Phi_n(\bar{h}_\alpha, R_s, R_l, \bar{E}_\alpha, \nu),$$

$$\Phi_n(h, R_s, R_l, E, \nu) = EhR_s^{-1}(1-\nu^2)^{-1}(\delta_n(k) + (h^2/(12R_s^2))\lambda_n(k)) \quad (n=1, 2, \dots),$$

$$\delta_n(k) = (1+k^2/4)^{-1}((k^2/2)(n^2 + ((1-\nu^2)/2)n^2k^2 + (1+\nu)^2k^2 + \nu + 1)/(n^2(n^2(1+k^2/2) + (1+\nu)k^2/2))),$$

$$\lambda_n(k) = (1+k^2/4)^{-1}((n^2-1+n^2k^2/2)(n^2(1+k^2/2)+k^2)/(n^2(1+k^2/2)+(1+\nu)k^2/2)+k^2/2), \quad k = R_s/R_l.$$

В п.3.1–п.3.4 разработаны методы учета разброса параметров при исследовании концентрации напряжений в изотропных и анизотропных пластинах с эллиптическими отверстиями и упругими включениями, с впаянными жесткими круговыми шайбами, а также с квадратными и треугольными отверстиями неопределенной кривизны в угловых точках. Представление показателя концентрации напряжений в растягиваемой ортотропной пластине, содержащей эллиптическое отверстие с полуосями, описываемыми нормальными нечеткими интервалами (a_1, a_2, a_3, a_4) , (b_1, b_2, b_3, b_4) ,

$$\text{получено в виде } (\tilde{\sigma}_s/p)_r = \bigcup_{\alpha \in [0,1]} [\tilde{F}_\alpha, \bar{F}_\alpha],$$

$$\tilde{F}_\alpha = \inf_{\eta_\alpha \in [\underline{\eta}_\alpha, \bar{\eta}_\alpha]} F(\eta_\alpha, s_{11}, s_{22}, s_{12}, s_{66}, \theta), \quad \bar{F}_\alpha = \sup_{\eta_\alpha \in [\underline{\eta}_\alpha, \bar{\eta}_\alpha]} F(\eta_\alpha, s_{11}, s_{22}, s_{12}, s_{66}, \theta),$$

$$\tilde{\eta}_\alpha = (1-\alpha)\eta_1 + \alpha\eta_2, \quad \bar{\eta}_\alpha = \alpha\eta_3 + (1-\alpha)\eta_4, \quad \eta_1 = b_1/a_4, \dots, \eta_4 = b_4/a_1;$$

$$F(\eta, s_{11}, s_{22}, s_{12}, s_{66}, \theta) = 1 + \sum_{j=1}^2 [b(1-\beta_j^2)(\cos 2\theta - m_j) (R_j(-1)^j (\beta_2 - \beta_1)(1 - 2m_j \cos 2\theta + m_j^2)^{-1}],$$

$$m_j = [(1-\beta_j \cdot \eta)/(1+\beta_j \cdot \eta)], \quad R_j = [a(1+\beta_j \cdot \eta)/2], \quad \beta_j = [((2s_{12} + s_{66}) + (-1)^{j+1}((2s_{12} + s_{66})^2 - 4s_{11}s_{22})^{1/2})/(2s_{11})]^{1/2}$$

Пример расчетов для случая $\tilde{a} = (1.85, 1.95, 2.1, 2.2)l_*$, $\tilde{b} = (0.85, 1.0, 1.1, 1.15)l_*$ и параметров жесткости $s_{11} = 4.12 \cdot s_*$, $s_{22} = 10.01 \cdot s_*$, $s_{12} = -1.70 \cdot s_*$, $s_{66} = 33.93 \cdot s_*$, $s_* = 10^{-12} \text{Па}$, $l_* = 1 \text{м}$, представлен на рисунке 7. Получено и расчетное соотношение для показателей концентрации напряжений у контура эллиптического упругого включения в изотропной пластине с нечетко-интервальными параметрами.

$$\text{Получено представление вида } \tilde{\sigma}_{mn}(r, \theta) = \bigcup_{\alpha \in [0,1]} [\underline{\sigma}_{mn\alpha}(r, \theta), \bar{\sigma}_{mn\alpha}(r, \theta)] \quad (mn = rr, \theta\theta, r\theta),$$

$$\underline{\sigma}_{mn\alpha}(r, \theta) = \inf_{\substack{p_j \in [\underline{p}_{j\alpha}, \bar{p}_{j\alpha}] \\ \mathcal{G} \in [\underline{\mathcal{G}}_\alpha, \bar{\mathcal{G}}_\alpha] \\ R \in [\underline{R}_\alpha, \bar{R}_\alpha]}} \{F_{mn}(p_1, p_2, \mathcal{G}, R, r, \theta)\}, \quad \bar{\sigma}_{mn\alpha}(r, \theta) = \sup_{\substack{p_j \in [\underline{p}_{j\alpha}, \bar{p}_{j\alpha}] \\ \mathcal{G} \in [\underline{\mathcal{G}}_\alpha, \bar{\mathcal{G}}_\alpha] \\ R \in [\underline{R}_\alpha, \bar{R}_\alpha]}} \{F_{mn}(p_1, p_2, \mathcal{G}, R, r, \theta)\}$$

$$F_{rr}(p_1, p_2, \mathcal{G}, R, r, \theta) = ((p_1 + p_2)/2)(1 - (R^2/r^2)((1-\mathcal{G})/2)) + ((p_1 - p_2)/2)(1 + 4\mathcal{G}^{-1}(R^2/r^2) - 3\mathcal{G}^{-1}(R^4/r^4))\cos 2\theta, .$$

$$\dots, \quad F_{r\theta}(p_1, p_2, \mathcal{G}, R, r, \theta) = ((p_2 - p_1)/2)(1 - 2\mathcal{G}^{-1}(R^2/r^2) + 3\mathcal{G}^{-1}(R^4/r^4))\sin 2\theta, \quad \mathcal{G} = (\lambda + 3\mu)/(\lambda + \mu)$$

для показателя концентрации напряжений у подкрепленного жесткой шайбой кругового отверстия радиуса \tilde{R} в пластине из материала с параметрами Ламе

$\tilde{\lambda}, \tilde{\mu}$ при двухстороннем растяжении усилиями \tilde{p}_1, \tilde{p}_2 с учетом неконтрастности экзогенных параметров.

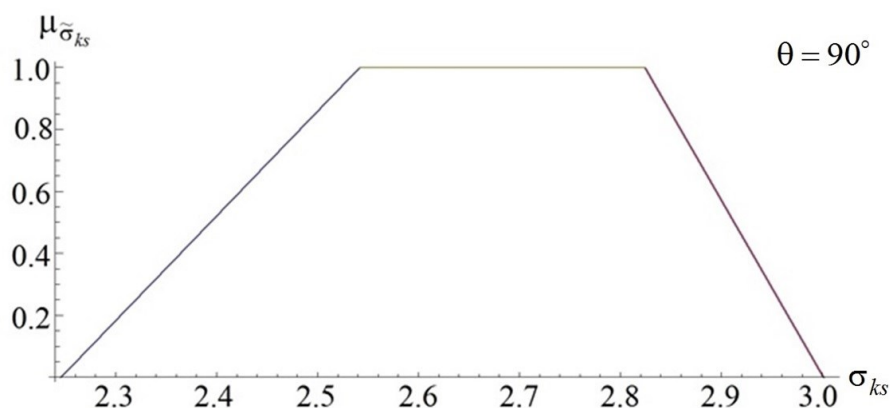


Рисунок 7 – Вид $\mu_{\tilde{\sigma}_{ks}}$

Расчеты показателей принадлежности для $\tilde{\sigma}_{rr}(R, \theta)$, $\tilde{\sigma}_{\theta\theta}(R, \theta)$, $\tilde{\sigma}_{r\theta}(R, \theta)$ представлены на рисунках 8–10. Внешние линии соответствуют уровням $\mu = 0$ и ограничивают интервалы носителей, а внутренние $\mu = 1$ ограничивают модальные диапазоны наиболее достоверных значений $\sigma_{mn}(R, \theta)$ при рассматриваемых разбросах исходных параметров.

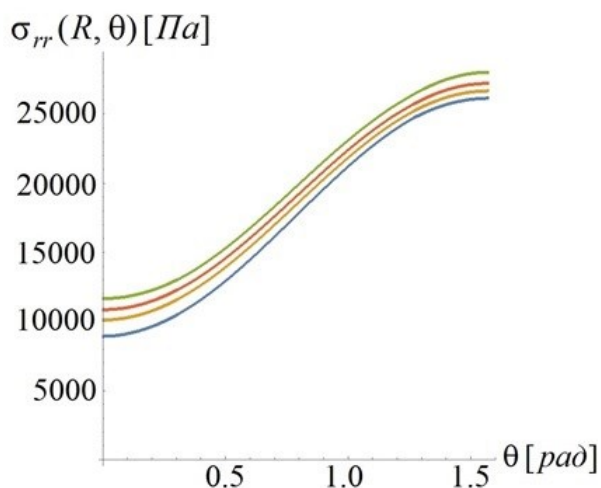


Рисунок 8 – Границы носителей и модальных интервалов для $\tilde{\sigma}_{rr}(R, \theta)$

В п. 3.4 дана разработка нечетко-множественного метода анализа моделей концентрации напряжений в растягиваемых пластинах с закругленными в углах отверстиями треугольной и квадратной формы с неконтрастной угловой кривизной $\tilde{k}_c = (k_1, k_2, k_3, k_4) = \bigcup_{\alpha \in [0,1]} [k_{c\alpha}, \bar{k}_{c\alpha}]$. Нечеткие параметры угловой

концентрации для растягиваемых вдоль направления Ox_1 пластин получены в виде $\tilde{F}_{jc}(\tilde{k}_c) = \bigcup_{\alpha \in [0,1]} [F_{jca}, \bar{F}_{jca}]$, $F_{jca} = \inf_{k_c \in [k_{c\alpha}, \bar{k}_{c\alpha}]} F_{jc}(k_c)$, $\bar{F}_{jca} = \sup_{k_c \in [k_{c\alpha}, \bar{k}_{c\alpha}]} F_{jc}(k_c)$, где для

квадратного отверстия $F_{1c}(k_c) = (3m+1)/(1-3m)$; для треугольного в лежащей на оси Ox_1 вершине $F_{2c}(k_c) = -(16m^2 + 14m + 3)/(2m+1)^2$. Результаты численного анализа модели даны на рисунке 11 для квадратного отверстия и на рисунке 12 для отверстия треугольной формы.

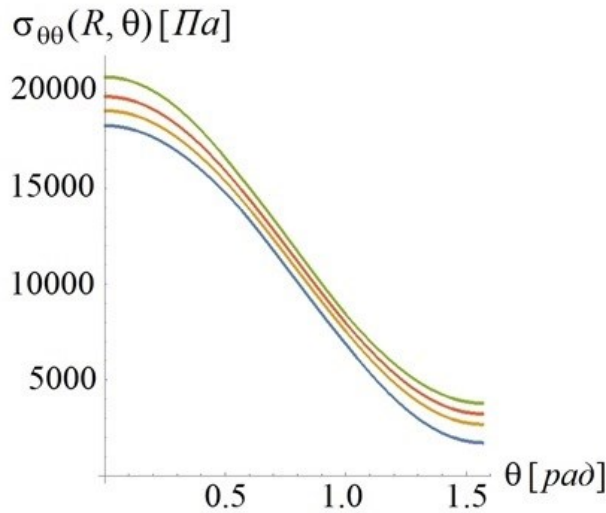


Рисунок 9 – Границы носителей и модальных интервалов для $\tilde{\sigma}_{\theta\theta}(R, \theta)$

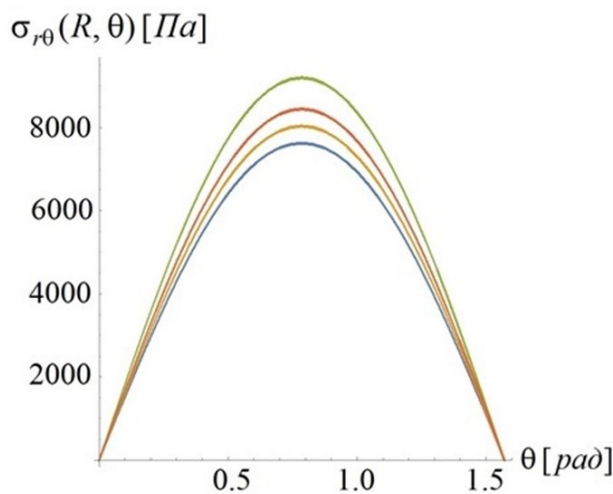


Рисунок 10 – Границы носителей и модальных интервалов для $\tilde{\sigma}_{r\theta}(R, \theta)$

В п. 3.5 работы дана разработка метода учета неконтрастности исходных параметров в модели концентрации напряжений у контура эллиптического отверстия в пьезоэлектрической пластине из материала класса 6mm гексагональной системы при обобщенном плоском напряженном состоянии. Для случая описания экзогенных параметров нечеткими интервалами получены представления для контурных характеристик напряженного состояния. На рисунках 14 и 15 представлены функции принадлежности для нечетко-множественных оценок $(\sigma_{ssp})_A = (\sigma_{ss})_A / p$, $(\sigma_{ssp})_B = (\sigma_{ss})_B / p$ в точках $A: \{x_1 = a, x_2 = 0\}$ и $B: \{x_1 = 0, x_2 = b\}$ контура отверстия в пластине из

пьезокерамики Ceramic В, растягиваемой вдоль оси Ox_1 усилиями p для случая неконтрастной жесткости материала. Отмечено снижение показателей неопределенности эндогенных характеристик при учете разбросов пьезомодулей и диэлектрических восприимчивостей в сравнении со случаем учета разбросов механических характеристик.

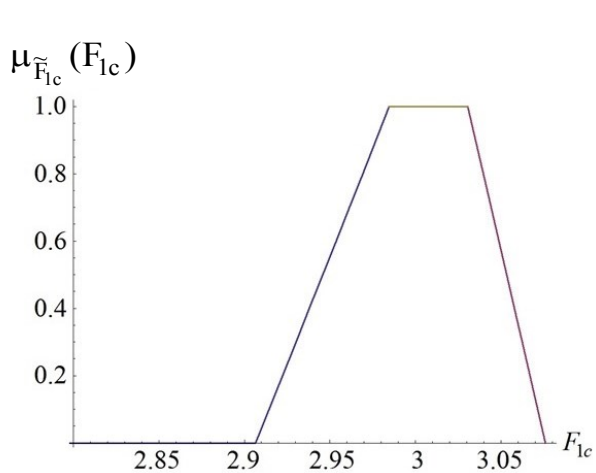


Рисунок 11 – Вид $\mu_{\tilde{F}_{1c}}$ для квадратного отверстия

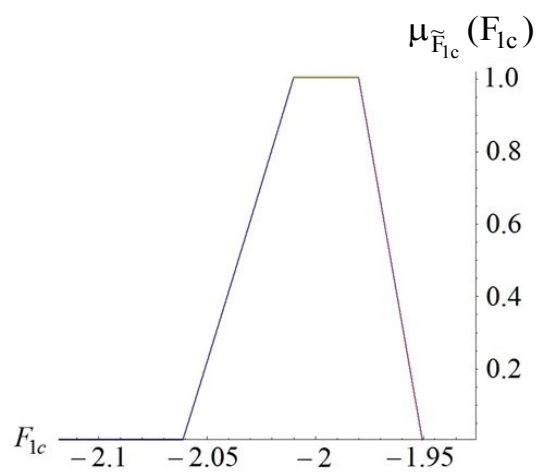


Рисунок 12 – Вид $\mu_{\tilde{F}_{1c}}$ для треугольного отверстия

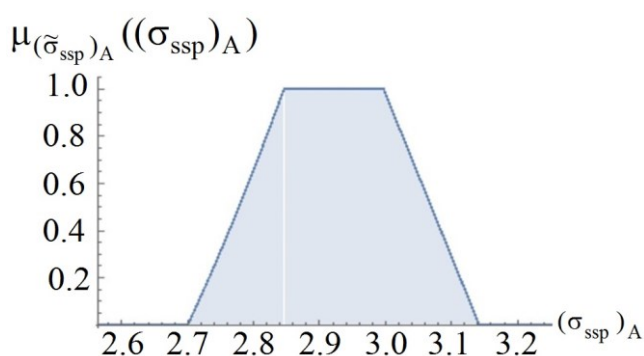


Рисунок 13 – Вид $\mu_{(\tilde{\sigma}_{ssp})_A}((\sigma_{ssp})_A)$

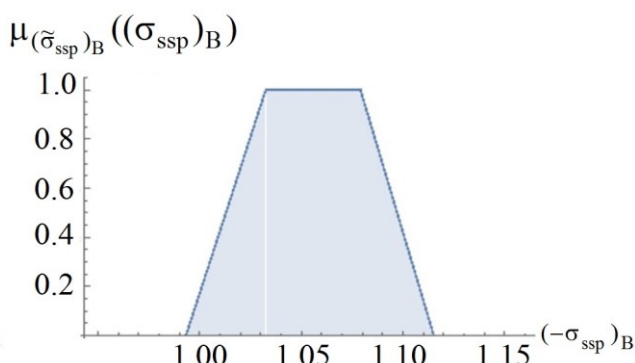


Рисунок 14 – Вид $\mu_{(\tilde{\sigma}_{ssp})_B}((\sigma_{ssp})_B)$

Заключительные подразделы главы посвящены нечетко-множественному моделированию охватывающих пластических зон вокруг полостей и отверстий кругового очертания в конструкционных элементах и геомассивах, а также анализу модели упругопластического деформирования конструкции в виде полой сферы. Получены нечетко-множественные обобщения результатов исследования моделей Г.П. Черепанова и Л.А. Галина, описывающих на базе критерия текучести Треска–Сен-Венана границу охватывающей упругопластической области около кругового отверстия радиуса R в изотропной пластине при двухосном растяжении равномерными усилиями q_j . Для случая нечетко-интервальных исходных параметров получены описания очертаний границ областей пластических деформаций. Результаты расчетов границ этих зон для пластины из алюминия в рамках исследованных моделей

соответственно представлены на рисунках 15 и 16. Внутренние линии 1 и 4 отвечают положениям границ пластических зон с нулевыми показателями принадлежности, а линии 2 и 3 – положениям указанных границ с уровнями принадлежности $\mu_{\tilde{x}_j(\theta)}(x_j(\theta)) = 1$.

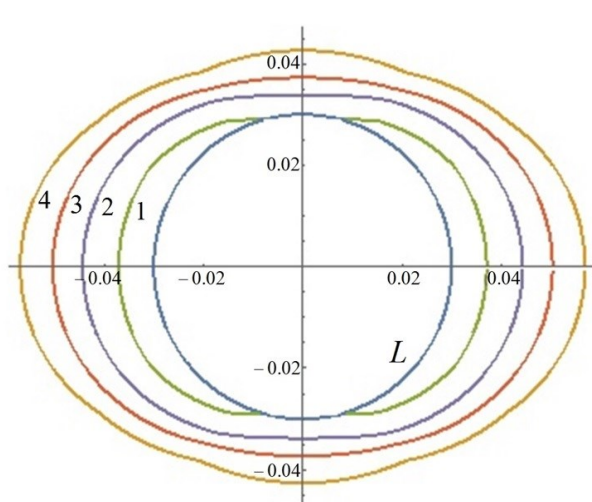


Рисунок 15 – Неконтрастная граница
пластической зоны
(модель Г.П. Черепанова)

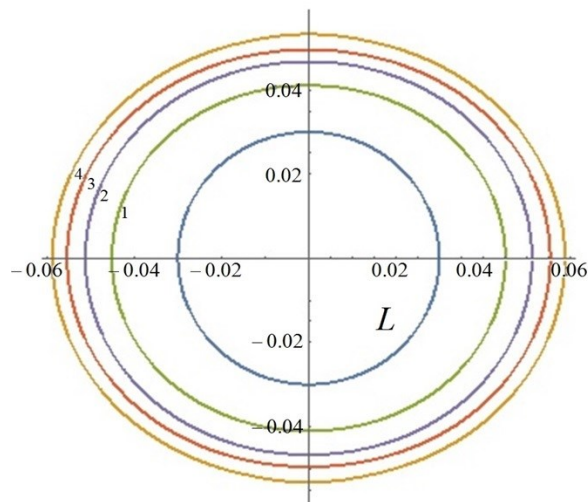


Рисунок 16 – Неконтрастная граница
пластической зоны
(модель Л.А. Галлина)

Построен также нечетко-множественный метод анализа модели формирования охватывающей пластической зоны кругового сечения вокруг подкрепленной цилиндрической горной выработки радиуса \tilde{R} , расположенной на глубине \tilde{h} в толще массива несжимаемой породы с плотностью $\tilde{\rho}$, углом внутреннего трения $\tilde{\varphi}$, параметром сцепления \tilde{C} под действием горного давления

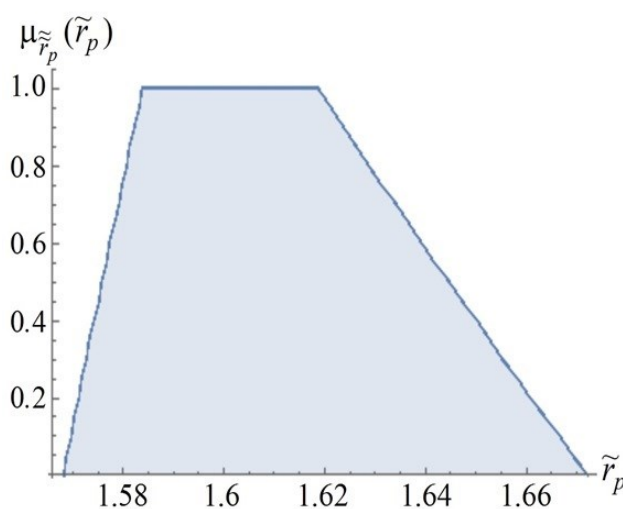


Рисунок 17 – Вид $\mu_{\tilde{r}_p}(r_p)$

интенсивности $\tilde{\rho g h}$. Пример расчета функции принадлежности для нечеткого приведенного радиуса охватывающей пластической области вокруг выработки в массиве алевролита, представлен на рисунке 17 в случае, когда нечетко-

интервальными являются экзогенные параметры $\tilde{q}_0 = (0.065c_*, 0.115c_*, q_{03} 0.165c_*, 0.215c_*)$, $c_* = 1$ [Мпа] $\tilde{n} = (2., 2.8, 4.2, 6)$, а остальные исходные параметры имеют точные значения $h = 1150$ [м], $\rho = 2.72 \cdot 10^3$ [кг/м³], $\varphi = 30^\circ$, $C = 1.94c_*$, $\sigma_p^{**} = 30c_*$. Разброс значений эндогенного параметра по отношению к среднему на интервале носителя составляет в данном случае порядка 3.3%.

Четвертый раздел посвящен разработке и программной реализации нечетко-множественных методов исследования моделей распространения, дисперсии и трансформации объемных, поверхностных и нормальных упругих волн. В п. 4.1 предложены методы учета неконтрастности физико-механических характеристик в моделях теории объемных волн для изотропных и анизотропных упругих сред, для анизотропных электроупругих сред. Получены нечетко-множественные описания параметров фазовых скоростей и волновых сопротивлений; дан прогноз разбросов указанных характеристик для угольных массивов. Предложен алгоритм нечетко-множественного анализа модели распространения объемных волн в пьезоэлектрической среде. Нечетко-множественные описания фазовых скоростей $\tilde{V}_f^{(j)}$ и коэффициентов затухания $\tilde{g}_f^{(j)}$ сдвиговых электроупругих волн в пьезокерамике на основе нечетко-интервальных представлений экзогенных параметров получены в виде

$$\tilde{V}_f^{(j)}(\omega) = \bigcup_{\alpha \in [0,1]} [V_{j\alpha}(\omega), \bar{V}_{j\alpha}(\omega)], \quad \tilde{g}_f^{(j)}(\omega) = \bigcup_{\alpha \in [0,1]} [g_{j\alpha}(\omega), \bar{g}_{j\alpha}(\omega)],$$

где

$$V_{j\alpha}(\omega) = \inf \{F_{V^*}^{(j)}(\omega, \delta_1, \delta_2, \delta_3, \delta_4)\}, \dots, \bar{g}_{j\alpha}(\omega) = \sup \{F_g^{(j)}(\omega, \delta_1, \delta_2, \delta_3, \delta_4)\},$$

$$\begin{aligned} \delta_1 &\in [\underline{\delta}_{1\alpha}, \bar{\delta}_{1\alpha}] \\ \delta_2 &\in [\underline{\delta}_{2\alpha}, \bar{\delta}_{2\alpha}] \\ \delta_3 &\in [\underline{\delta}_{3\alpha}, \bar{\delta}_{3\alpha}] \\ \delta_4 &\in [\underline{\delta}_{4\alpha}, \bar{\delta}_{4\alpha}] \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \delta_1 &\in [\underline{\delta}_{1\alpha}, \bar{\delta}_{1\alpha}] \\ \delta_2 &\in [\underline{\delta}_{2\alpha}, \bar{\delta}_{2\alpha}] \\ \delta_3 &\in [\underline{\delta}_{3\alpha}, \bar{\delta}_{3\alpha}] \\ \delta_4 &\in [\underline{\delta}_{4\alpha}, \bar{\delta}_{4\alpha}] \end{aligned}$$

$$F_{V^*}^{(j)}(\omega, \delta_1, \delta_2, \delta_3, \delta_4) = \sqrt{2[\operatorname{Re}[(\delta_1 + \delta_2 + \delta_3 - i\omega^{-1}\delta_4) + (-1)^j[(\delta_1 + \delta_2 + \delta_3 - i\omega^{-1}\delta_4)^2 - 4\delta_1(\delta_2 - i\omega^{-1}\delta_4)]^{1/2}]^{1/2}]}^{-1},$$

$$\underline{\delta}_{1\alpha} = (1 - \alpha)\rho_1c_4^{-1} + \alpha\rho_2c_3^{-1}, \quad \bar{\delta}_{1\alpha} = \alpha\rho_3c_2^{-1} + (1 - \alpha)\rho_4c_1^{-1}, \dots, \underline{\delta}_{4\alpha} = (1 - \alpha)\mu_0\sigma_1 + \alpha\mu_0\sigma_2,$$

$\bar{\delta}_{4\alpha} = \alpha\mu_0\sigma_3 + (1 - \alpha)\mu_0\sigma_4$. Получены также нечетко-множественные описания эндогенных характеристик моделей распространения электроупругих волн с варьируемыми типами связности сопряженных полей. Нечеткие оценки для скоростей объемных ультразвуковых волн вдоль направления, лежащего в плоскости Ox_1x_3 и составляющего угол θ с осью поляризации в пьезокерамике $BaTiO_3$, с учетом разбросов экспериментальных параметров представлены на рисунке 18.

Дано применение нечетко-множественного подхода при анализе модели распространения объемных волн деформаций в упруго-пористых газодонасыщенных средах в рамках теории многокомпонентных сред Био с учетом неопределенности экзогенных параметров, которая является базовой для описания дисперсии упругих волн в реальных сатурированных горных породах при решении задач сейсмоакустического зондирования геомассивов.

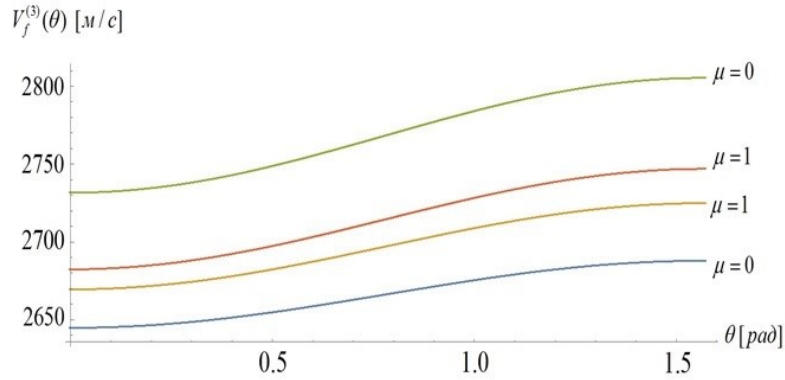


Рисунок 18 – Границы носителей и модальных интервалов для $\tilde{V}_f^{(3)}(\theta)$

Для нечетко-интервальных описаний параметров жидкости в порах и материала каркаса получены представления скоростей волн сдвига в многокомпонентной среде

$$\tilde{V}_s(\omega) = \bigcup_{\alpha \in [0,1]} [V_{s\alpha}(\omega), \bar{V}_{s\alpha}(\omega)],$$

$$V_{s\alpha}(\omega) = (\underline{\mu}_\alpha (1 + (\underline{k}_\alpha^2 / 9g^2)\omega^2)(\bar{\rho}_{1\alpha} (1 + (\underline{k}_\alpha^2 / 9g^2)\omega^2) + \bar{\rho}_{2\alpha})^{-1})^{1/2},$$

$$\bar{V}_{s\alpha}(\omega) = (\bar{\mu}_\alpha (1 + (\bar{k}_\alpha^2 / 9g^2)\omega_j^2)(\underline{\rho}_{1\alpha} (1 + (\bar{k}_\alpha^2 / 9g^2)\omega_j^2) + \underline{\rho}_{2\alpha})^{-1})^{1/2},$$

и для скоростей других типов волн. На их основе разработан алгоритм идентификации параметров сатурированных геоматериалов по неконтрастным экспериментальным данным о скоростях волн сдвига для ряда значений частотного параметра ω_j .

В п. 4.2 получены нечетко-множественные оценки для скоростей поверхностных волн релеевского и сдвигового типа в изотропном и трансверсально-изотропном полупространстве с нечетко-интервальными разбросами параметров. Для неопределенных скоростей ПАВ Релея получено представление $\tilde{\mathcal{G}} = \bigcup_{\alpha \in [0,1]} [\underline{\mathcal{G}}_\alpha, \bar{\mathcal{G}}_\alpha]$

$$\underline{\mathcal{G}}_\alpha = \inf_{\substack{\rho \in [\underline{\rho}_\alpha, \bar{\rho}_\alpha] \\ \lambda \in [\underline{\lambda}_\alpha, \bar{\lambda}_\alpha] \\ \mu \in [\underline{\mu}_\alpha, \bar{\mu}_\alpha]}} \mathcal{G}(\rho, \lambda, \mu), \quad \bar{\mathcal{G}}_\alpha = \sup_{\substack{\rho \in [\underline{\rho}_\alpha, \bar{\rho}_\alpha] \\ \lambda \in [\underline{\lambda}_\alpha, \bar{\lambda}_\alpha] \\ \mu \in [\underline{\mu}_\alpha, \bar{\mu}_\alpha]}} \mathcal{G}(\rho, \lambda, \mu),$$

где $\mathcal{G}(\rho, \lambda, \mu)$ – явное аналитическое представление ветви действительных корней уравнения $\eta^3 - 8\eta^2 + (24 - 16\gamma)\eta + 16(\gamma - 1) = 0$, $\eta = (\rho / \mu)\mathcal{G}^2$, $\gamma = \mu / (\lambda + 2\mu)$. Разработано программное приложение для реализации расчетного алгоритма; пример получаемых нечетко-множественных оценок для скорости релеевской волны в полупространстве из титана представлен на рисунке 19. При максимальном разбросе для экзогенных параметров $\pm 5\%$ разброс для модальных значений нечеткой фазовой скорости $\tilde{\mathcal{G}}$ составляет $\pm 1.9\% \cdot \mathcal{G}_{\text{средн}}$, а

предельно возможные отклонения в значениях получаемой оценки $\tilde{\vartheta}$ от $\vartheta_{\text{средн}}$ лежат в диапазоне $[-4.6\% \cdot \vartheta_{\text{средн}}, 4.9\% \cdot \vartheta_{\text{средн}}]$.

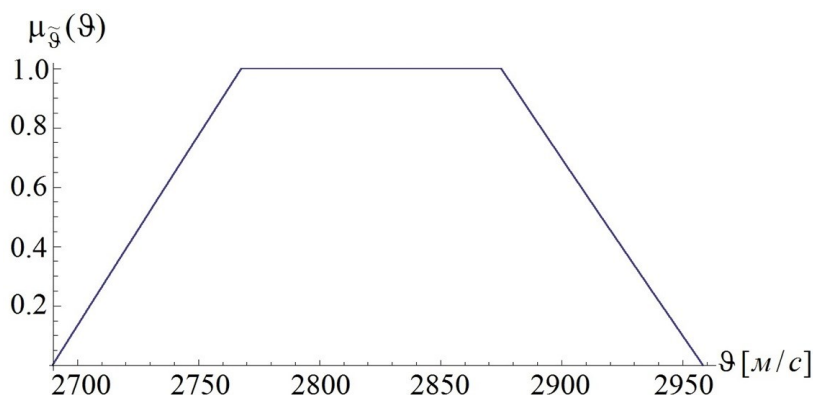


Рисунок 19 – Вид $\mu_{\tilde{\vartheta}}(\vartheta)$

Представлены также результаты нечетко-множественного анализа модели распространения электроакустической волны Гуляева-Блюстейна в полупространстве пьезоэлектрика класса 6 mm гексагональной системы, поверхность которого граничит с непьезоактивным диэлектриком.

Далее в п. 4.3 предложены методы нечетко-множественного оценивания характеристик отражения и преломления волн деформаций для случая нормального падения продольных волн на границу идеального контакта разнородных изотропных и трансверсально-изотропных полупространств; падения плоской сдвиговой электроупругой волны на границу контакта полупространств из пьезокерамик класса 6mm.

В п. 4.4 представлена разработка метода получения нечетких оценок в модели генерирования нелинейных вторых гармоник объемных волн сдвига в трансверсально-изотропной упругой среде; получены нечетко-множественные описания интенсивностей ангармонических возмущений для объемных волн в трансверсально-изотропных нелинейных средах.

Получение нечетко-множественных оценок для характеристик нормальных волн в однослойных и двухслойных волноводах с разбросами параметров представлено в п. 4.5. Для нечетко-множественного параметра $\tilde{v}_f^{(n)}$ фазовых скоростей нормальных волн продольного сдвига длины $\tilde{\lambda}$ из моды с номером n в трансверсально-изотропном слое толщины $2\tilde{h}$ при нечетко-интервальном описании плотности и упругих постоянных материала получены представления

$$\tilde{v}_f^{(n)} = \bigcup_{\alpha \in [0,1]} \{ (\alpha \rho^{(3)} + (1-\alpha)\rho^{(4)})^{-1/2} (((1-\alpha)c_{44}^{(1)} + \alpha c_{44}^{(2)})(\eta_n \delta / (2\pi))^2 + ((1-\alpha)c_{11}^{(1)} + \alpha c_{11}^{(2)} - \alpha c_{12}^{(3)} - (1-\alpha)c_{12}^{(4)})/2)^{1/2},$$

$$(\alpha \rho^{(2)} + (1-\alpha)\rho^{(1)})^{-1/2} (((1-\alpha)c_{44}^{(4)} + \alpha c_{44}^{(3)})(\eta_n \delta / (2\pi))^2 + ((1-\alpha)c_{11}^{(4)} + \alpha c_{11}^{(3)} - \alpha c_{12}^{(2)} - (1-\alpha)c_{12}^{(1)})/2)^{1/2} \}.$$

Зависимости нечеткой скорости антисимметричной нормальной волны из низшей моды спектра в закрепленном слое из калиевой слюды от параметра

приведенной длины $\delta = \lambda/h$ при разбросах экспериментальных значений упругих констант $\pm 5\%$ даны на рисунке 20.

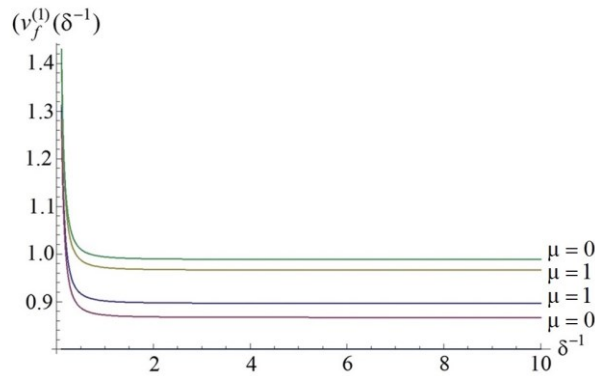


Рисунок 20 – Границы носителей и модальных интервалов для $\tilde{v}_f^{(1)}(\delta^{-1})$

Реализован также анализ модели нечетко-множественного расчета фазовых скоростей нормальных волн сдвига в анизотропном функционально-градиентном слое с неконтрастными параметрами.

В п. 4.6 представлен анализ нечетко-множественной модели расчета фазовых скоростей нормальных волн в прямоугольных волноводах с мембранными покрытиями и проскальзывающими закреплениями граней при нечетко-интервальных описаниях экзогенных параметров. Пример описания нечетких скоростей волн низшей моды в волноводе из монокристалла кремния дан на рисунке 21. Установлено, что разбросы экзогенных и эндогенных параметров в данных моделях являются величинами одного порядка. Отмечена тенденция к уменьшению уровня неопределенности фазовых скоростей с ростом частотного параметра.

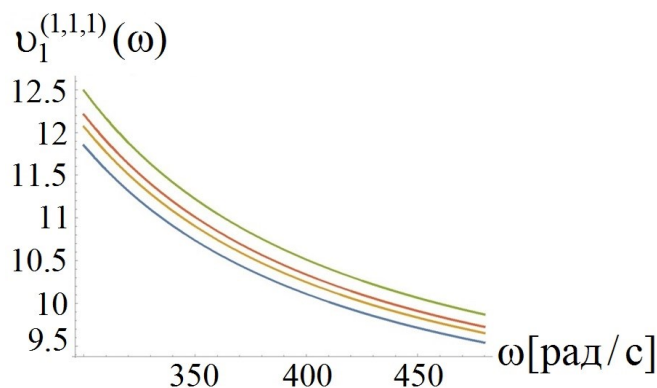


Рисунок 21 – Границы носителей и модальных интервалов для $\tilde{v}_1^{(1,1,1)}(\omega)$

В п. 4.7 предложен метод нечетко-множественного анализа факторов неопределенности в моделях плоских пористых и перфорированных гидроакустических экранов из ячеистой резины и пенополиуретана, рассматриваемых как однородные квазиизотропные материалы с приведенными характеристиками. При получении нечетко-множественных оценок для усредненного значения ε коэффициента концентрации равномерно

распределенных по объему сферических полостей-микронеоднородностей в пористой среде и параметров ν, E ячеистой матрицы, вводятся их описания нечеткими интервалами $\tilde{\varepsilon}, \tilde{\nu}, \tilde{E}$, а для эндогенного параметра объемного модуля упругости \tilde{K} записывается представление $\tilde{K} = \bigcup_{\alpha \in [0,1]} (\underline{K}_\alpha, \overline{K}_\alpha)$,

$$\underline{K}_\alpha = (2/3)\underline{E}_\alpha(1-\bar{\varepsilon}_\alpha)(\bar{\varepsilon}_\alpha(1+\underline{\nu}_\alpha)+2(1-2\underline{\nu}_\alpha))^{-1}, \quad \overline{K}_\alpha = (2/3)\overline{E}_\alpha(1-\underline{\varepsilon}_\alpha)(\underline{\varepsilon}_\alpha(1+\overline{\nu}_\alpha)+2(1-2\overline{\nu}_\alpha))^{-1}.$$

На рисунке 22 приведены расчетные результаты получения \tilde{K} при задании экзогенных параметров в виде

$$\tilde{E} = (7300, 11200, 12800, 13100) [Mna], \quad \tilde{\nu} = (0.38, 0.43, 0.45, 0.47), \quad \tilde{\varepsilon} = (0.5, 0.65, 0.75, 0.8).$$

Далее в разделе 4 исследована модель нечетко-множественного оценивания импеданса поперечно-анизотропного перфорированного гидроакустического покрытия с различными типами герметизации воздухозаполненных полостей при нечетко-интервальном описании исходных параметров. Разработаны также метод и программное приложение для получения нечетко-множественных оценок влияния разбросов исходных параметров на характеристики окруженного идеальной жидкостью плоского гидроакустического экрана из поперечно-анизотропного вязкоупругого функционально-градиентного материала.

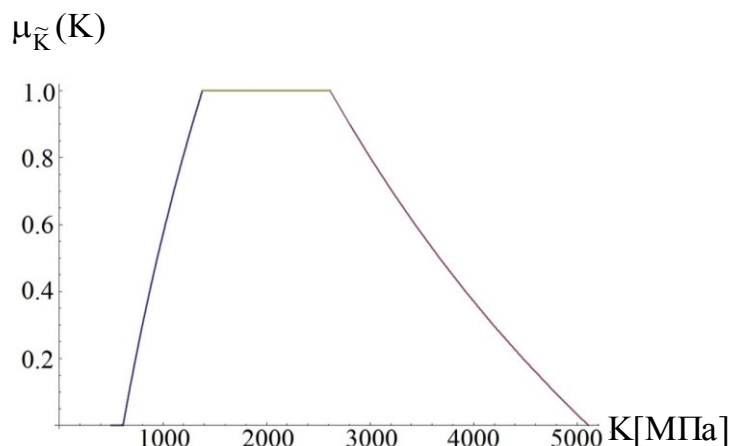


Рисунок 22 – Вид $\mu_{\tilde{K}}(K)$

Аналогичный метод разработан для модели однослойного экрана из функционально-градиентного материала триклинной системы, а также модели наклонного падения волны давления при наличии на гранях слоя тонких гибких нерастяжимых покрытий, и для слоя без покрытий.

Пятый раздел работы посвящен исследованию проблем нечетко-множественного моделирования в прямых и обратных задачах теории резонансных колебаний пластин, панелей и цилиндров. Так, в п. 5.1 разработан алгоритм учета неопределенности экзогенных параметров в модели колебаний тонких многослойных графеновых нанопластин. Получение оценок собственных частот \tilde{f}_{npq} поперечных колебаний с формами (p, q) для шарнирно-опертой прямоугольной нанопластины из $n+1$ слоя графена с

плотностью ρ_0 , модулями упругости E_{ij}, G_{ij} , а также из n межслойных промежутков толщины h_0 , заполненных изотропной средой с податливостью $G_{13}^{(0)}$ и исчезающе малой плотностью, при учете разбросов для $l_1, l_2, h_0, \rho_0, E_{11}, E_{13}, E_{33}, G_{13}^{(0)}$ базируется на нечетко-интервальной фаззификации неконтрастных параметров и применении эвристического принципа обобщения к соотношениям

$$f_{npq} = F_{npq}(l_1, l_2, h_0, \rho_0, E_{11}, E_{13}, E_{33}, G_{13}^{(0)}, n, p, q) = (h_0^{3/2} / (2\pi)) (p^2 l_1^{-2} + q^2 l_2^{-2}) \rho_0^{-1/2} \cdot ((n(n+2))^{1/2} (E_{11} - E_{13} / E_{33}))^{1/2} (1 + \delta_n (E_{11} - E_{13} / E_{33}) \pi^2 h_0^2 (p^2 l_1^{-2} + q^2 l_2^{-2}) / G_{13}^{(0)})^{-1/2}.$$

Для частотного параметра получено представление $\tilde{f}_{npq} = \bigcup_{\alpha \in [0,1]} [f_{npq\alpha}, \bar{f}_{npq\alpha}]$,

$$\underline{f}_{npq\alpha} = \inf_{\substack{K_0 \in [\underline{K}_{0\alpha}, \bar{K}_{0\alpha}] \\ R_{pq} \in [\underline{R}_{pq\alpha}, \bar{R}_{pq\alpha}]}} \Phi_{npq}(\underline{\rho}_{0\alpha}, \underline{G}_{13\alpha}, K_0, R_{pq}, n, p, q), \quad \bar{f}_{npq\alpha} = \sup_{\substack{K_0 \in [\underline{K}_{0\alpha}, \bar{K}_{0\alpha}] \\ R_{pq} \in [\underline{R}_{pq\alpha}, \bar{R}_{pq\alpha}]}} \Phi_{npq}(\underline{\rho}_{0\alpha}, \bar{G}_{13\alpha}, K_0, R_{pq}, n, p, q).$$

Результаты определения характеристики \tilde{f}_{411} для $\tilde{l}_1 = (3,25; 3,39; 3,42; 3,45)l_*$, $\tilde{l}_2 = (3,12; 3,18; 3,19; 3,24)l_*$, $\tilde{h}_0 = (0,31; 0,32; 0,33; 0,345)l_*$, $\tilde{h}_0 = (0,31; 0,32; 0,33; 0,345)l_*$, $l_* = 1$ [нм]; $\tilde{\rho}_0 = (7,580; 7,608; 7,610; 7,625)\rho_*$, $\rho_* = 1$ [10^{-7} кг/м²], $\tilde{E}_{11} = (1030; 1050; 1110; 1170)$ [ГПа], $\tilde{E}_{13} = (6,5; 8,9; 10,0; 17,5)$ [ГПа], $\tilde{E}_{33} = (36,5; 36,9; 37,6; 38,9)$ [ГПа], $\tilde{G}_{13}^{(0)} = (3,9; 4,7; 4,95; 5,35)$ даны на рисунке 24.

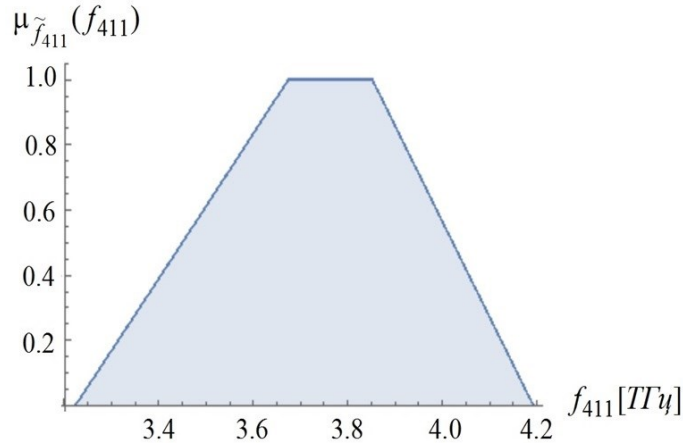


Рисунок 23 – Вид $\mu_{\tilde{f}_{411}}(f_{411})$

Представлена разработка нечетко-множественного метода анализа модели резонансных колебаний трехслойных композитных цилиндрических панелей с пьезоактивными внешними слоями для систем активного гашения резонансных вибраций. Расчетные соотношения для резонансной частоты получены в виде $\tilde{\omega}_{mn} = \bigcup_{\alpha \in [0,1]} [\underline{\omega}_{mn\alpha}, \bar{\omega}_{mn\alpha}]$,

$$\underline{\omega}_{mn\alpha} = [\underline{\rho}_{*\alpha}^{-1} (\underline{D}_{11R\alpha} k_m^4 + 2(\underline{D}_{12R\alpha} + 2\underline{D}_{66R\alpha}) k_m^2 p_n^2 + \underline{D}_{22\alpha R} p_n^4 + k_m^4 \underline{\Delta}_{mnR\alpha} (\underline{R}_\alpha^2 (\underline{\Delta}_{mnR\alpha} + \underline{\Delta}_{mnl\alpha}^2)))^{-1}]^{1/2},$$

$$\bar{\omega}_{mn\alpha} = [\bar{\rho}_{*\alpha}^{-1} (\bar{D}_{11R\alpha} k_m^4 + 2(\bar{D}_{12R\alpha} + 2\bar{D}_{66R\alpha}) k_m^2 p_n^2 + \bar{D}_{22R\alpha} p_n^4 + k_m^4 \bar{\Delta}_{mnR\alpha} (\bar{R}_\alpha^2 (\bar{\Delta}_{mnR\alpha} + \bar{\Delta}_{mnl\alpha}^2)))^{-1}]^{1/2}.$$

Выполнены расчеты для конструкции со средним слоем из волокнистого углепластика и внешними слоями из керамики титанат-цирконат свинца.

В п. 5.3 и п. 5.4 представлены разработка и программная реализация методов анализа модели собственных колебаний предварительно напряженных изотропных прямоугольных пластин на основе нечетко-интервальной интерпретации параметров с разбросами, а также модели нечеткой идентификации механических характеристик $\tilde{\nu}, \tilde{E}$ свободно опертых плит с длинами сторон a_1, a_2 , плотностью ρ и толщиной h на основе резонансно-волновой методики с учетом разбросов экспериментальных данных о скоростях сдвиговых волн в материале плиты и собственных частотах поперечных вибраций с показателями изменчивости n_1, n_2 . Искомые оценки имеют вид

$$\tilde{\nu} = \bigcup_{\alpha \in [0,1]} (\underline{\nu}_\alpha, \bar{\nu}_\alpha), \quad \tilde{E} = \bigcup_{\alpha \in [0,1]} (\underline{E}_\alpha, \bar{E}_\alpha)$$

$$\underline{\nu}_\alpha = 1 - (\bar{V}_{s\alpha} / \underline{\omega}_{11\alpha})^2 h^2 \pi^4 ((1/a_1)^2 + (1/a_2)^2)^2 / 6, \quad \bar{\nu}_\alpha = 1 - (\underline{V}_{s\alpha} / \bar{\omega}_{11\alpha})^2 h^2 \pi^4 ((1/a_1)^2 + (1/a_2)^2)^2 / 6,$$

$$\underline{E}_\alpha = 2\rho \underline{V}_{s\alpha}^2 (2 - (\underline{V}_{s\alpha} / \underline{\omega}_{11\alpha})^2 h^2 \pi^4 ((1/a_1)^2 + (1/a_2)^2)^2 / 6),$$

$$\bar{E}_\alpha = 2\rho \bar{V}_{s\alpha}^2 (2 - (\bar{V}_{s\alpha} / \bar{\omega}_{11\alpha})^2 h^2 \pi^4 ((1/a_1)^2 + (1/a_2)^2)^2 / 6).$$

На рисунках 24, 25 представлены результаты их расчетов для плиты из алюминия с параметрами $a_1 = 1.0 [m]$, $a_2 = 0.5 [m]$, $h = 0.01 [m]$, $\rho = 2700 [kg/m^3]$ по экспериментальным данным $\tilde{V}_s = (3.010 \cdot 10^6, 3.070 \cdot 10^6, 3.095 \cdot 10^6, 3.135 \cdot 10^6) [m/sec]$, $\tilde{\omega}_{11} = (740, 760, 770, 785) [rad/sec]$,

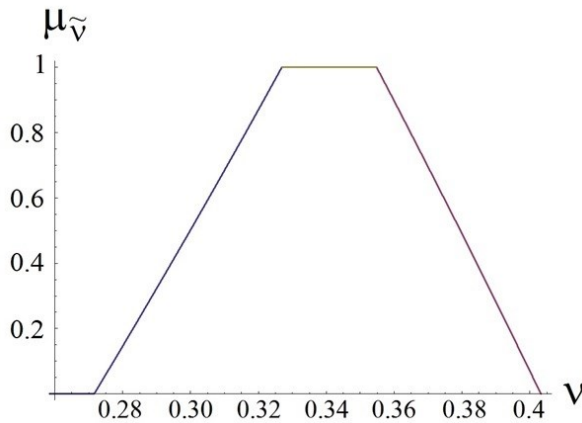


Рисунок 24 – Вид $\mu_{\tilde{\nu}}(V)$

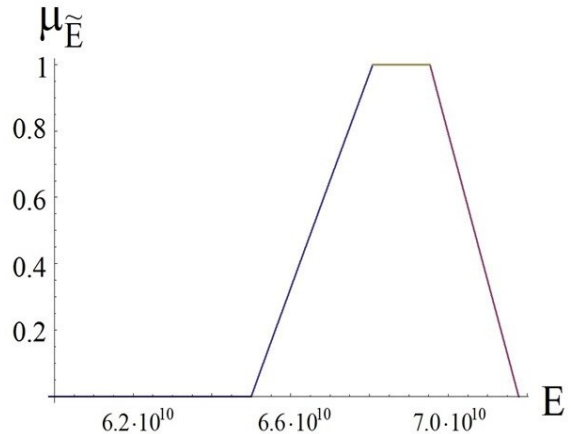


Рисунок 25 – Вид $\mu_{\tilde{E}}(E)$

Аналогичный подход разработан для случая использования неконтрастных экспериментальных данных о резонансных частотах поперечных колебаний с окружным волновым числом n для закрепленной круглой плиты радиуса R ; при этом $\underline{\nu}_\alpha = 1 - (\bar{V}_{s\alpha} / \underline{\omega}_{jn\alpha})^2 h^2 \beta_{jn}^4 R^{-4} / 6$, $\bar{\nu}_\alpha = 1 - (\underline{V}_{s\alpha} / \bar{\omega}_{jn\alpha})^2 h^2 \beta_{jn}^4 R^{-4} / 6$,

$$\underline{E}_\alpha = 2\rho \underline{V}_{s\alpha}^2 (2 - (\underline{V}_{s\alpha} / \underline{\omega}_{jn\alpha})^2 h^2 \beta_{jn}^4 R^{-4} / 6), \quad \bar{E}_\alpha = 2\rho \bar{V}_{s\alpha}^2 (2 - (\bar{V}_{s\alpha} / \bar{\omega}_{jn\alpha})^2 h^2 \beta_{jn}^4 R^{-4} / 6).$$

В п. 5.5 исследована модель нечеткой идентификации параметров нанокompозитных функционально-градиентных пластин с использованием неконтрастных данных ультразвуковой диагностики и решения задачи о

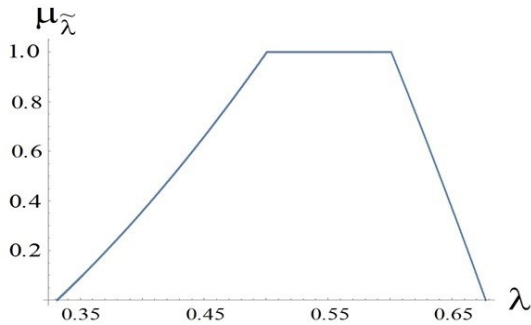
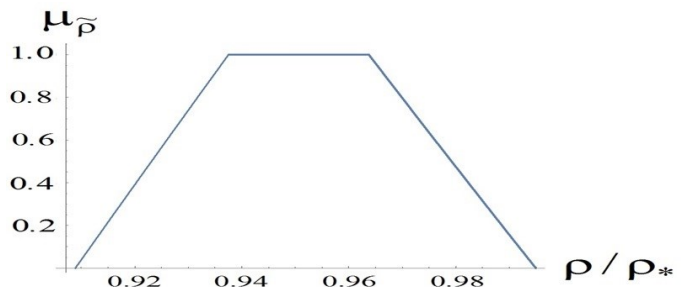
распространении нормальной SH волны с частотой ω и волновым числом k в трансверсально-изотропном функционально-градиентном упругом слое толщины $2h$ с параметром экспоненциальной неоднородности λ и известной плотностью m . Полагается, что для нормальных волн из низшей моды спектра $p=0$ с частотами ω_1 , ω_2 и ω_3 экспериментально определяются неконтрастные параметры длины δ_{01} , δ_{02} и δ_{03} , а для волны с частотой ω_4 из моды $p=1$ ($\omega_4 > \omega_3$) определяется неконтрастный параметр длины δ_{14} ($\delta_{14} > \delta_{03}$). Для идентифицируемых характеристик получены представления

$$\tilde{\lambda} = \bigcup_{\alpha \in [0,1]} [\underline{\lambda}_\alpha, \bar{\lambda}_\alpha], \quad \tilde{\rho} = \bigcup_{\alpha \in [0,1]} [\underline{\rho}_\alpha, \bar{\rho}_\alpha], \quad \tilde{c}_{66} = \bigcup_{\alpha \in [0,1]} [\underline{c}_{66\alpha}, \bar{c}_{66\alpha}], \quad \tilde{c}_{44} = \bigcup_{\alpha \in [0,1]} [\underline{c}_{44\alpha}, \bar{c}_{44\alpha}],$$

$$\underline{\lambda}_\alpha = \inf_{\substack{\omega_j \in [\underline{\omega}_{j\alpha}, \bar{\omega}_{j\alpha}] \\ \delta_{0j} \in [\underline{\delta}_{0j\alpha}, \bar{\delta}_{0j\alpha}] \\ \delta_{14} \in [\underline{\delta}_{14\alpha}, \bar{\delta}_{14\alpha}] \\ m \in [\underline{m}_\alpha, \bar{m}_\alpha]}} \{\Phi_\lambda(\omega_1, \omega_2, \omega_3, \omega_4, \delta_{01}, \delta_{02}, \delta_{03}, \delta_{14}, h, m)\}, \quad \bar{\lambda}_\alpha = \sup_{\substack{\omega_j \in [\underline{\omega}_{j\alpha}, \bar{\omega}_{j\alpha}] \\ \delta_{0j} \in [\underline{\delta}_{0j\alpha}, \bar{\delta}_{0j\alpha}] \\ \delta_{14} \in [\underline{\delta}_{14\alpha}, \bar{\delta}_{14\alpha}] \\ m \in [\underline{m}_\alpha, \bar{m}_\alpha]}} \{\Phi_\lambda(\omega_1, \omega_2, \omega_3, \omega_4, \delta_{01}, \delta_{02}, \delta_{03}, \delta_{14}, h, m)\},$$

$$\Phi_\lambda(\omega_1, \omega_2, \omega_3, \omega_4, \delta_{01}, \delta_{02}, \delta_{03}, \delta_{14}, h, m) = 2[(\omega_3^2 - 4\pi^2 ((\omega_2^2 - \omega_1^2)/(4\pi^2(\delta_{02}^{-2} - \delta_{01}^{-2})))\delta_{03}^{-2}) / ((\omega_4^2 - \omega_3^2 + 4\pi^2(\delta_{03}^{-2} - \delta_{14}^{-2}))(\omega_2^2 - \omega_1^2)/(4\pi^2(\delta_{02}^{-2} - \delta_{01}^{-2}))) / (\Delta_1 - \Delta_0)) - \Delta_0]^{1/2}, \quad \Delta_p = (p\pi/(2h))^2.$$

Описания идентифицируемых параметров $\tilde{\lambda}$, $\tilde{\rho}$ для пластины толщины $h=1.0$ при нечетко-интервальных экспериментальных данных $\tilde{\omega}_1 : (0.49, 0.50, 0.51, 0.53)$; $\tilde{\omega}_2 : (0.98, 0.99, 1.00, 1.03)$; $\tilde{\omega}_3 : (1.49, 1.50, 1.52, 1.54)$; $\tilde{\omega}_4 : (1.97, 1.99, 2.01, 2.04)$; $\tilde{\delta}_{02} : (8.72, 8.84, 8.93, 9.05)$; $\tilde{\delta}_{03} : (5.74, 5.91, 5.99, 6.15)$; $\tilde{\delta}_{14} : (7.02, 7.18, 7.23, 7.45)$; $\tilde{m} : (1.96, 1.99, 2.03, 2.10)$, $c_* = 10^{10}$, $\rho_* = 10^3$ даны на рисунках 26, 27.

Рисунок 26 – Вид $\mu_{\tilde{\lambda}}(\lambda)$ Рисунок 27 – Вид $\mu_{\tilde{\rho}}(\rho)$

Шестой раздел посвящен разработке нечетко-множественных методов учета неопределенности в моделях рассеяния охлаждающих жидкостей, газожидкостной термостабилизации и теплового экранирования. Так, в п. 6.1 представлен метод оценивания характеристик функционирования центробежно-струйных и центробежных форсунок в технических системах термостабилизации при описании нечеткими интервалами либо нечеткими гауссовыми числами разбросов в значениях исходных параметров устройств. Получены нечетко-множественные описания для геометрической характеристики \tilde{A}^* , коэффициента заполнения сопла $\tilde{\varphi}$, параметров расхода жидкости $\tilde{\mu}$, факела распыла $\tilde{\beta}$ и скорости \tilde{v}_{fc} истечения жидкости из сопла

центробежно-струйной форсунки. Аналогичный анализ проведен для модели центробежной форсунки. Показано, что для форсунок этого типа на интервалах носителей разбросы величин эндогенных параметров составляют не более 4% для характеристик $\tilde{\varphi}$ и $\tilde{\mu}$, и $\approx 2.3\%$ для $\tilde{\beta}$.

Далее, в п. 6.2 дана разработка и алгоритмизация нечетко-множественного подхода к учету неопределенности параметров при моделировании распада струи жидкости в пневматических распылителях с зависимостями $R_k(\beta)$, $V_k(\beta)$ расхода и скорости истечения смеси от угла раствора β конической головки, и отдельные результаты их анализа приведены на рисунках 28, 29.

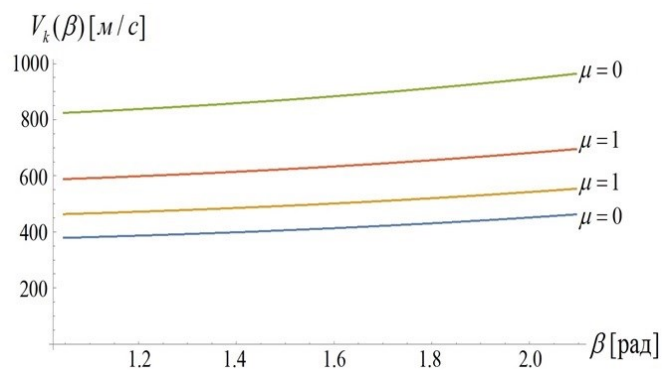


Рисунок 28 – Границы носителей и модальных интервалов для $V_k(\beta)$

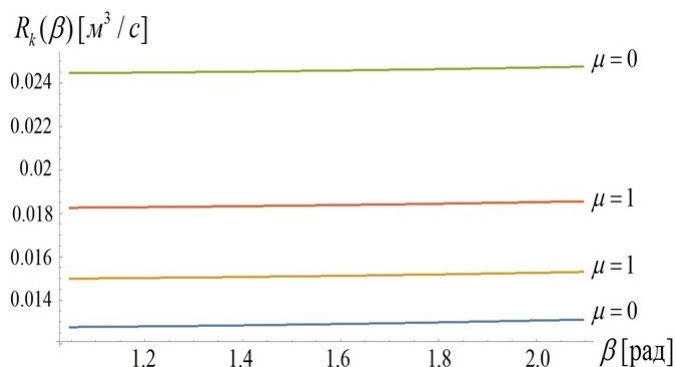


Рисунок 29 – Границы носителей и модальных интервалов для $R_k(\beta)$

Разработан нечетко-множественный метод учета неопределенности в модели формирования жидкостно-капельного потока вертикально вращающимся дисковидным распылителем охлаждающего реагента. При описании неконтрастных характеристик модели нечеткими интервалами получены оценки $\tilde{\varphi}_1, \tilde{\varphi}_2$ для угловых размеров зоны распыления и описания нечетких траекторий движения капель $\tilde{x}(t)_{1q_i}, \tilde{x}(t)_{2q_i}$ вдоль этих угловых направлений; примеры их расчета представлены на рисунках 30, 31 в виде границ возможных траекторий движения капли с момента ее отрыва от поверхности рабочего органа и до соприкосновения с поверхностью в случае распыления воды вращающимся против часовой стрелки со средней скоростью 17 об/с диском

распылителя с неконтрастными параметрами радиуса 0,1 м и высоты размещения 2 м.

Рассмотрены вопросы получения нечетко-множественных оценок в моделях теплообмена при продольном обтекании двухфазными потоками разогретых плоских поверхностей и цилиндрических каналов. Получены представления для нечетко-множественных функций распределения температуры $\tilde{\vartheta}(y)$ и коэффициента теплоотдачи $\tilde{\alpha}_f$ от поверхности к двухфазному потоку.

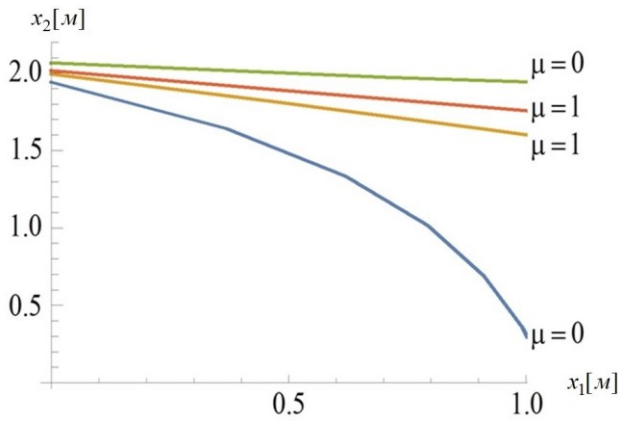


Рисунок 30 – Неконтрастные границы траектории распыления вдоль $\tilde{\varphi}_1$

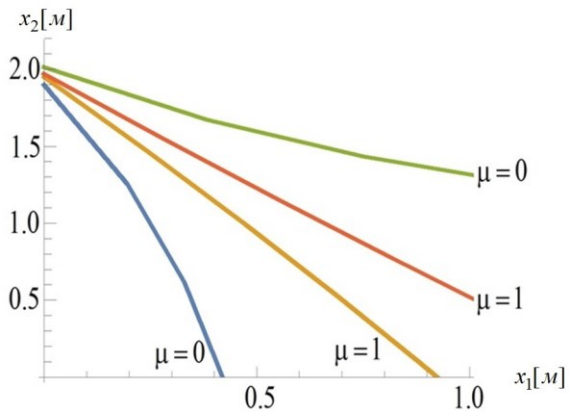


Рисунок 31 – Неконтрастные границы траектории распыления вдоль $\tilde{\varphi}_2$

В п. 6.4 представлен метод нечетко-множественного анализа параметров теплообмена в модели действия плазменных струй на высокотемпературные поверхности при создании внешних охлаждающих газовых потоков и вдувании газа изнутри охлаждаемого объекта через пористые либо перфорированные стенки.

В п. 6.5 представлена разработка нечетко-множественных подходов в моделях расчета тепловых экранов с теплоотражающими и теплоизолирующими слоями. Для модели n-слойного экрана с неконтрастными характеристиками получены оценки для показателя кратности ослабления теплового потока \tilde{m} , коэффициента эффективности экранирования $\tilde{\eta}$ с представлениями

$$\tilde{m} = \bigcup_{\alpha \in [0,1]} [F_{m\alpha}, \bar{F}_{m\alpha}], \quad F_{m\alpha} = F_m(\underline{\varepsilon}_{1\alpha}, \underline{\varepsilon}_{2\alpha}, \underline{\varepsilon}_{3i\alpha}), \quad \bar{F}_{m\alpha} = F_m(\bar{\varepsilon}_{1\alpha}, \bar{\varepsilon}_{2\alpha}, \bar{\varepsilon}_{3i\alpha});$$

$$\tilde{\eta} = \bigcup_{\alpha \in [0,1]} [F_{\eta\alpha}, \bar{F}_{\eta\alpha}], \quad F_{\eta\alpha} = F_{\eta}(\underline{\varepsilon}_{1\alpha}, \underline{\varepsilon}_{2\alpha}, \underline{\varepsilon}_{3i\alpha}), \quad \bar{F}_{\eta\alpha} = F_{\eta}(\bar{\varepsilon}_{1\alpha}, \bar{\varepsilon}_{2\alpha}, \bar{\varepsilon}_{3i\alpha});$$

$$F_m(\varepsilon_1, \varepsilon_2, \varepsilon_{3i}) = 1 + (2 \sum_{j=1}^n \varepsilon_{3j}^{-1} - n)(\varepsilon_1^{-1} + \varepsilon_2^{-1} - 1)^{-1}, \quad F_{\eta}(\varepsilon_1, \varepsilon_2, \varepsilon_{3i}) = (2 \sum_{j=1}^n \varepsilon_{3j}^{-1} - n)(\varepsilon_1^{-1} + \varepsilon_2^{-1} + 2 \sum_{i=1}^n \varepsilon_{3i}^{-1} - (n+1))^{-1},$$

и для параметра теплового потока $\tilde{q}_{3,2}$ на тепловоспринимающую поверхность за экраном. Разработан алгоритм анализа влияния факторов неопределенности в модели функционирования плоских двухслойных тепловых экранов.

ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ ПО РАБОТЕ

В диссертационной работе получено новое решение актуальной научно-технической проблемы разработки нечетко-множественных методов анализа математических моделей деформационных и тепловых процессов с учетом факторов неопределенности экзогенных параметров, включая создание комплекса программных приложений для числовой реализации алгоритмов исследования как инструмента повышения эффективности и адекватности проектных конструкторских расчетов для ряда промышленных отраслей. Основные выводы, научные и практические результаты работы заключаются в следующем.

1. Разработана концепция создания комплекса методов использования теории нечетких вычислений для учета факторов разброса исходных параметров в моделях деформирования упругих тел и конструкционных элементов, а также в моделях функционирования технических систем термостабилизации на основе расширения областей определения расчетных соотношений детерминистических вариантов соответствующих моделей на аргументы нечетко-множественных типов с фрагментированным поэтапным применением аппарата нечеткой арифметики и модифицированной альфа-уровневой формы эвристического принципа обобщения; предложенные методы обладают дополнительными возможностями и перспективами прикладного применения и характеризуются менее строгими требованиями к характеру неконтрастной исходной информации, включая возможности использования маломощных выборок экспериментальных данных и результатов субъективных экспертных заключений.

2. Осуществлены разработка и алгоритмизация нечетко-множественных методов исследования моделей расчета характеристик резонансных колебаний, скоростей волн деформаций и критических усилий в задачах динамического деформирования и устойчивости стержневых конструкций в рамках классических и уточненных теорий, применение которых в проектных расчетах позволяет повысить достоверность оценок ресурсов прочности, надежности и функциональности конструкционных элементов данного типа в машинах, приборах и строительных сооружениях.

3. Осуществлены разработка и алгоритмизация методов нечетко-множественного учета неопределенности в моделях деформирования и устойчивости тонких пластин и оболочек, применение которых в инженерной практике позволяет получить более адекватные рекомендации по допустимым диапазонам варьирования проектных параметров машин и сооружений, в пределах которых обеспечиваются требования устойчивости, надежности, мгновенной и длительной прочности тонкостенных конструкций.

4. Реализованы разработка и алгоритмизация нечетко-множественных методов учета факторов неопределенности в задачах формирования полей концентрации напряжений и зон пластических деформаций около полостей,

отверстий и включений в тонких пластинах и геомассивах, использование которых при конструировании строительных деталей и несущих конструкций машин, компонентов электронных устройств, проектировании горных сооружений с выработками и туннелями приводит к более адекватным практике рекомендациям по выбору конструкционных материалов, форм, размеров и способов размещения технологических полостей и включений, обеспечивающим требования надежности и прочности технических устройств и сооружений.

5. Осуществлена разработка методов и алгоритмов нечетко-множественного моделирования в задачах теории резонансных упругих колебаний пластин, панелей и цилиндров, применение которых позволяет улучшить характеристики прочности и надежности деталей машин, приборов и сооружений, работающих в условиях вибрационных нагрузений широких частотных диапазонов.

6. Даны разработка и алгоритмизация моделей нечетко-множественной резонансно-волновой идентификации механических характеристик тонких изотропных и нанокompозитных функционально-градиентных пластин с использованием данных ультразвуковой диагностики, применение которой для обработки экспериментальных данных обеспечивает повышение степени соответствия результатов идентификации геометрических и физико-механических характеристик конструкций реальным свойствам объектов.

7. Предложены и реализованы методы нечетко-множественного исследования математических моделей распространения и дисперсии объемных, поверхностных и нормальных волн упругих, электроупругих и магнитоупругих деформаций при учете разбросов значений экзогенных параметров моделирования, повышающие уровень корректности и практической ценности оценок сейсродинамических и геоакустических прогнозов и измерений, точности расчетов для конструкций акустоэлектронных радиокомпонентов, достоверности оценок вибрационной прочности для несущих конструкций в машинах, строительных и горно-шахтных сооружениях.

8. Созданы нечетко-множественные методы анализа моделей функционирования и алгоритмы расчета параметров плоских гидроакустических экранов при учете неопределенности исходных данных, что позволяет при их конструировании добиваться необходимой меры стабильности показателей интенсивности отраженных и генерируемых за экраном волновых сигналов.

9. Осуществлена разработка нечетко-множественных методов и алгоритмов учета неопределенности для моделей форсуночного рассеяния охлаждающих жидкостей в системах термостабилизации, применение которых в конструкторских расчетах обеспечивает совершенствование параметров рабочих устройств и технологических процессов жидкостно-капельного

охлаждения, включая показатели расхода и определение допустимой меры изменений в конструктивных параметрах форсунок при износе.

10. Реализована разработка нечетко-множественных методов и алгоритмов учета факторов неопределенности для математических моделей распада струи жидкости в пневматических и ротационных дисковых распылителях устройств воздушно-капельного охлаждения, позволяющих повысить адекватность оценок для факелов и траекторий движения капель распыляемой жидкости при проектировании технических устройств систем термостабилизации.

11. Разработаны нечетко-множественные методы исследования факторов неопределенности в моделях термостабилизации высокотемпературных поверхностей обтекающими газопаровыми потоками, обеспечивающие получение более адекватных инженерной практике рекомендаций по выбору режимов охлаждения потоками аэрозолей, параметров дисперсности парожидкостной фракции и скоростей обтекания.

12. Разработаны методы и алгоритмы нечетко-множественного анализа моделей теплоотражающих экранов с неопределенными конструктивными характеристиками, применение которых в проектных расчетах позволяет определять параметры пакетов тонких мембранных отражающих элементов, более адекватные реальным эксплуатационным условиям и обеспечивающие заданные показатели эффективности экранирования тепловых излучений в технических системах

13. Указаны области эффективного применения созданных методов при проектировании технических систем в машиностроении, строительстве, приборостроении и электронике, горном деле и определены перспективные направления дальнейших исследований в области прикладного нечетко-множественного моделирования деформационных и тепловых процессов.

14. Разработанные нечетко-множественные методы и программные приложения получили практическое применение в АО «НИИВК им. М.А. Карцева» при расчетах параметров нанорезонаторов, ультразвуковых линий задержки и фильтров на ПАВ, в ГУ РАНИМИ МОН ДНР при обработке геоакустической информации о свойствах массивов горных пород с выработками. Результаты внедрены также в учебном процессе в ГОУ ВПО ДОННУ МОН ДНР.

ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

– В рецензируемых изданиях, рекомендованных ВАК ДНР:

1. Сторожев, С.В. Нечетко-множественное обобщение методик оценки стратегий в условиях неопределенности / С.В. Сторожев // Вестн. Донецк. нац. ун-та. Сер. А. Естеств. науки. – 2014. – №1. – С. 111–115.

2. Сторожев, С.В. Алгоритм двухпараметрической аппроксимации нормального частотного распределения нечетким интервалом / С.В. Сторожев // Вестн. Донецк. нац. ун-та. Сер. А. Естеств. науки. – 2014. – №2. – С. 78–80.

3. Сторожев, С.В. Нечетко-множественная методика исследования модели движения капель охлаждающей жидкости при отрыве с поверхности вертикально вращающегося распылителя / С.В. Сторожев, Чан Ба Ле Хоанг // Тр. ИПММ. – 2020. – Вып. 34. – С. 112–124.

4. Павлыш, В.Н. Исследование модели упругопластического деформирования полого шара под действием внутреннего давления в рамках вероятностного и нечетко-множественного подходов / В.Н. Павлыш, С.В. Сторожев // Журн. теорет. и прикл. мех. – 2021. – № 2 (75). – С. 60–67.

5. Болнокин, В.Е. Алгоритм анализа моделей устойчивости цилиндрических оболочек с неконтрастными параметрами на основе применения алгебры двухкомпонентных треугольных нечетких чисел / В.Е. Болнокин, В.Н. Павлыш, С.В. Сторожев // Журн. теорет. и прикл. мех. – 2021. – № 3 (76). – С. 32–45.

– В рецензируемых изданиях, рекомендованных ВАК РФ:

6. Болнокин, В.Е. Оценки влияния нечеткости параметров геометрических объектов в эвристических расчетных алгоритмах / В.Е. Болнокин, Д.Ч. Нгуен, С.В. Сторожев, С.Б. Номбре // Сист. управл. и информац. технол. – 2017. – №1(67). – С. 68–71.

7. Болнокин, В.Е. Методика нечеткого оценивания эндогенных характеристик в моделях анизотропных функционально-градиентных гидроакустических экранов / В.Е. Болнокин, Зыонг Минь Хай, С.В. Сторожев // Эконом. и менеджм. сист. управл. – 2017. – №4.2 (26). – С. 204–209.

8. Болнокин, В.Е. Нечетко-множественный анализ влияния факторов неопределенности в модели трансверсально-изотропного функционально-градиентного гидроакустического экрана / В.Е. Болнокин, Зыонг Минь Хай, С.В. Сторожев // Эконом. и менеджм. сист. управл. – 2018. – № 2 (28). – С. 71–78

9. Болнокин, В.Е. Анализ нечеткой модели наклонного падения гидроакустической волны на плоский экран с гибкими нерастяжимыми покрытиями граней / В.Е. Болнокин, В.Г. Выскуб, Зыонг Минь Хай, С.В. Сторожев // Сист. управл. и информац. технол. – 2018. – № 3 (73). – С. 7–12.

10. Болнокин, В.Е. Нечеткие оценки эффективных характеристик микронеоднородных материалов для конструкций гидроакустического экранирования / В.Е. Болнокин, Зыонг Минь Хай, С.В. Сторожев // Сист. управл. и информац. технол. – 2017 – №4 (70). – С. 4–8.

11. Болнокин, В.Е. Анализ нечеткой модели концентрации механических напряжений в тонких пластинах с квадратными отверстиями неопределенной угловой кривизны / В.Е. Болнокин, Д.И. Мути, С.В. Сторожев, Зыонг Минь

Хай, Чан Ба Ле Хоанг // Сист. управл. и информац. технол. – 2019. – № 4(78) – С. 47–50.

12. Болнокин, В.Е. Нечеткие оценки для собственных частот поперечных колебаний однородных стержней / В.Е. Болнокин, Д.И. Мутин, С.В. Сторожев, Зыонг Минь Хай, Нгуен Куок Ци, Чан Ба Ле Хоанг // Сист. управл. и информац. технол. – 2019. – № 4(78) – С. 24–28.

13. Болнокин, В.Е. Методика учета факторов неопределенности в моделях термоупругого деформирования тонких пластин с эллиптическими граничными контурами / В.Е. Болнокин, В.Г. Выскуб, Д.И. Мутин, Е.И. Мутина, С.Б. Номбре, С.В. Сторожев // Сист. управл. и информац. технол. – 2020. – № 2(80). – С. 4–8.

– Публикации в журналах, включенных в наукометрические базы Web of Science, MathSciNet и Scopus:

14. Сторожев, В.И. Нечетко-множественные оценки в моделях теории объемных волн деформаций / В.И. Сторожев, С.В. Сторожев // Мех. тверд. тела. – 2015. – Вып. 45. – С. 103–111.

15. Волчков, Вит.В. Нечеткие оценки для скоростей поверхностных волн релеевского типа в упругом полупространстве / Вит.В. Волчков, С.В. Сторожев // Мех. тверд. тела. – 2016. – Вып. 46. – С. 111–118.

16. Болнокин, В.Е. Оценки влияния нечеткости экзогенных параметров в модели обобщенного плоского напряженного состояния изотропной пластины с эллиптическим упругим включением / В.Е. Болнокин, С.Б. Номбре, С.В. Сторожев // Мех. тверд. тела. – 2017. – Вып. 47. – С. 122–136.

17. Болнокин, В.Е. Нечеткая модель взаимодействия гидроакустических волн с плоским вязкоупругим трансверсально-изотропным экраном / В.Е. Болнокин, Е.И. Митрушкин, Зыонг Минь Хай, С.В. Сторожев // Мех. тверд. тела. – 2018. – Вып. 48. – С. 95–105.

18. Митрушкин, Е.И. Нечеткая идентификация механических характеристик тонких изотропных плит на основе резонансно-волновой методики / Е.И. Митрушкин, С.А. Прийменко, С.В. Сторожев // Мех. тверд. тела. – 2018. – Вып. 48. – С. 88–94.

19. Vyskub, V.G. Model of fuzzy estimation of mechanical stress concentration for aerospace and industrial flat structures with polygonal holes of uncertain curvature at rounded corner points / V.G. Vyskub, E.I. Mutina, V.I. Storozhev, S.V. Storozhev // IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. and Eng. – 2019. – V. 537. – 022013. doi:10.1088/1757-899X/537/2/022013

20. Bolnokin, V.E. The synthesis of the algorithms for adaptive control by nonlinear dynamic objects on the basis of the neural network / V.E. Bolnokin, D.I. Mutin, E.I. Mutina, S.V. Storozhev // IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. and Eng. – 2019. – V. 537. – 042013. doi:10.1088/1757-899X/537/4/042013

21. Storozhev, S.V. Model of fuzzy ultra-acoustic diagnostics of nanocomposite functionally graded plate constructions in mechanical engineering /

S.V. Storozhev, V.I. Storozhev, V.E. Bolnokin, Duong Minh Hai, D.I. Mutin // J. Phys. Conf. Ser. – 2019. – V. 1399. – 022008. doi:10.1088/1742-6596/1399/2/022008

22. Storozhev, S.V. Fuzzy estimates of resonance frequencies for three-layer composite cylindrical panels in smart aerospace and industrial structures / S.V. Storozhev, V.I. Storozhev, V.E. Bolnokin, Duong Minh Hai, D.I. Mutin // J. Phys. Conf. Ser. – 2019. – V. 1399. – 033044. doi:10.1088/1742-6596/1399/3/033044

23. Storozhev, S.V. Fuzzy-multiple estimates of the parameter uncertainty influence in the computing devices elements calculating theory / S.V. Storozhev, V.I. Storozhev, V.G. Vyskub, Duong Minh Hai, V.E. Bolnokin // IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. and Eng. – 2019. – V. 1399. – 044028. doi:10.1088/1742-6596/1399/4/044028

24. Storozhev, S.V. Fuzzy-set analysis of models of temperature deformation of thin-walled elements with elliptic boundaries in industrial and aerospace structures / S.V. Storozhev, V.I. Storozhev, V.E. Bolnokin, Duong Minh Hai, D.I. Mutin // IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. and Eng. – 2020. – V. 862. – 022005. doi.org/10.1088/1757-899X/862/2/022005

25. Bolnokin, V.E. Accounting of data uncertainty in advanced technological models of design calculations of acoustoelectronic components from piezoelectric materials / V.E. Bolnokin, D.I. Mutin, E.I. Mutina, S.V. Storozhev, V.I. Storozhev // IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. and Eng. – 2020. – V. 862. – 022006. doi:10.1088/1757-899X/862/2/022006

26. Storozhev, S.V. Features of ultrasonic non-destructive testing models of rectangular anisotropic elastic waveguides with a membrane coating / S.V. Storozhev, V.E. Bolnokin, V.G. Vyskub, Duong Minh Hai, D.I. Mutin // J. Phys. Conf. Ser. – 2020. – V. 1679. – 042039. doi:10.1088/1742-6596/1679/4/042039

27. Storozhev, S.V. Analysis of the engineering mathematical model of the physical properties of a three-layer hydroacoustic screen with anisotropic components / S.V. Storozhev, V.I. Storozhev, V.E. Bolnokin, S.A. Sorokin // J. Phys. Conf. Ser. – 2021. – V. 2094. – 022011. doi:10.1088/1742-6596/2094/2/022011

– Монография:

28. Нгуен, Куок Ши. Исследование моделей высокотемпературной термостабилизации с нечеткими параметрами / Нгуен Куок Ши, Чан Ба Ле Хоанг, С.В. Сторожев.– Yelm, WA, USA: Sci. Book Publish. House, 2019. – 216 с.

– В других изданиях:

29. Storozhev, S.V. Uncertainty in the models of the theory of volume elastic waves through the use of the theory of fuzzy sets / S.V. Storozhev // Model. and inf. technol.: select. papers of the int. sci. school «Paradigma» (Summer-2015, Varna, Bulgaria). – Yelm, WA, USA: Sci. Book Publish. House, 2015. – P. 45–52.

30. Сторожев, С.В. Моделирование факторов неопределенности в процессах взаимодействия электроупругих волн с плоской границей контакта

пьезокерамических тел / С.В. Сторожев // Журн. теорет. и прикл. мех. – 2016. – № 1 (56). – С. 46–59.

31. Сторожев, С.В. Нечетко-множественная методика оценки влияния разбросов исходных параметров на характеристики напряженного состояния изгибаемых тонких изотропных плит / С.В. Сторожев // Журн. теорет. и прикл. мех. – 2019. – № 4 (69). – С. 3–20.

32. Павлыш В.Н., Сторожев С.В., Номбре С.Б. Исследование нечетких моделей устойчивости и резонансных колебаний замкнутых сферических и эллипсоидальных оболочек // Журн. теорет. и прикл. мех. – 2020. – № 3 (72). – С. 32–42.

33. Павлыш, В.Н. Нечеткие оценки в модели распространения магнитоупругих волн / В.Н. Павлыш, С.В. Сторожев, С.Б. Номбре // Журн. теорет. и прикл. мех. – 2020. – № 4 (73). – С. 33–48.

34. Павлыш, В.Н. Нечетко-множественный анализ математической модели устойчивости тороидальных оболочек / В.Н. Павлыш, С.В. Сторожев // Журн. теорет. и прикл. мех. – 2021. – № 1 (74). – С. 65–72.

35. Сторожев С.В. Нечетко-множественный анализ факторов неопределенности в геоакустической модели волнового деформирования многокомпонентной среды: теоретический алгоритм / С.В. Сторожев // Тр. РАНМИ. – 2021. – № 12-13 (27-28). – С. 67–84.

Личный вклад автора. Все основные аналитические и численные результаты представленных в диссертации исследований по разработке методов нечётко-множественного анализа моделей деформационных и тепловых процессов с неопределенными параметрами, а также результаты разработки алгоритмов и комплексов программных приложений для компьютерной реализации разработанных нечетко-множественных методов, получены лично автором работы. В совместно проведенных исследованиях и опубликованных работах, соавторам Е.И. Митрушкину, Е.И. Мутиной, В.Г. Выскубу, Нгуен Куок Ши, Чан Ба Ле Хоанг, Зыонг Минь Хай, Нгуен Динь Чунг принадлежат консультации по техническим вопросам в конкретных типах рассматриваемых моделей; в совместно подготовленных и опубликованных работах соавторам В.И. Сторожеву, Вит В. Волчкову, В.Е. Болнокину, Д.И. Мутину, В.А. Шалдырвану принадлежат участие в постановке рассматриваемых задач и рекомендации по структуре осуществляемых теоретических исследований; соавторам совместно подготовленных и опубликованных работ А.А. Глухову, С.А. Прийменко, С.Б. Номбре принадлежат участие в определении конфигурации комплексов разрабатываемых программных приложений, осуществлении численных экспериментов на базе предложенных методов, а также участие в обработке и систематизации результатов численного анализа.

АННОТАЦИЯ

Сторожев С.В. Нечетко-множественные методы учета факторов неопределенности в математических моделях деформационных и тепловых процессов. – Рукопись.

Диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук по специальности 05.13.18 – Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ (технические науки) – ГОУВПО «ДОНЕЦКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ», Донецк, 2021 г.

В диссертации решена актуальная научно-техническая проблема разработки нечетко-множественных методов и алгоритмов исследования математических моделей деформационных и тепловых процессов с учетом факторов неопределенности экзогенных параметров как инструмента повышения эффективности проектных конструкторских расчетов для ряда промышленных отраслей. Предложены нечетко-множественные методы получения оценок влияния разбросов экзогенных параметров в моделях деформирования и устойчивости прямых стержней, изгиба тонких плит, термоупругого деформирования пластин эллиптического очертания, а также устойчивости трехслойных пластин и цилиндрических оболочек. Разработаны нечетко-множественные методы учета неопределенности при исследовании моделей концентрации напряжений и возникновения зон пластических деформаций около полостей и отверстий, моделей распространения, дисперсии и трансформации объемных, поверхностных и нормальных упругих волн. Представлена разработка алгоритмов нечетко-множественного моделирования в прямых и обратных задачах теории резонансных колебаний пластин, панелей и цилиндров, учета факторов неопределенности в моделях колебаний тонких многослойных графеновых нанопластин, резонансных колебаний трехслойных композитных цилиндрических панелей. Разработаны теоретические алгоритмы анализа моделей нечетко-множественной резонансно-волновой идентификации механических характеристик тонких изотропных и нанокompозитных функционально-градиентных пластин с использованием данных ультразвуковой диагностики. Осуществлена разработка нечетко-множественных методов учета неопределенности в моделях рассеяния охлаждающих жидкостей, газожидкостной термостабилизации и теплового экранирования, включая нечетко-множественные алгоритмы оценивания характеристик функционирования центробежно-струйных и центробежных форсунок, пневматических и дисковых распылителей в системах жидкостно-капельного охлаждения. Представлены решения задач учета неопределенности в моделях теплообмена при течении газожидкостных потоков вдоль разогретых поверхностей и цилиндрических каналов, взаимодействии пульсирующего потока с вибрирующей перфорированной стенкой при учете вдувания газа-охлаждителя.

Ключевые слова: прикладные модели, упругое и пластическое деформирование, факторы неопределенности, разбросы экзогенных

параметров, теоретическое исследование, методы теории нечетких множеств, эвристический принцип расширения, алгоритмы определения эндогенных параметров, программные приложения.

ABSTRACT

Storozhev S.V. Fuzzy-set methods of accounting of uncertainty factors in mathematical models of deformation and thermal processes. – Manuscript.

Dissertation for the doctor's degree in technical sciences, specialty 05.13.18 – Mathematical modeling, numerical methods and program complexes (technical sciences). – STATE HIGHER EDUCATIONAL ESTABLISHMENT “DONETSK NATIONAL TECHNICAL UNIVERSITY”, Donetsk, 2021.

In the dissertation the actual scientific and technical problem of developing fuzzy-set methods and algorithms for studying mathematical models of deformation and thermal processes, taking into account the uncertainty factors of exogenous parameters as a tool for increasing the efficiency of design calculations for a number of industrial sectors and modern high-tech industries is solved. Fuzzy-set methods are proposed for obtaining estimates of the influence of scatter errors of exogenous parameters in applied models of deformation and stability of thin-walled structures, including models of transverse vibrations, stability, propagation of torsion waves for straight rods, the stress state of bending thin isotropic plates, thermoelastic deformation of thin plates of elliptical shape, as well as stability of three-layer plates and cylindrical shells. Fuzzy-set methods have been developed for accounting for uncertainty in the study of models of stress concentration and the occurrence of zones of plastic deformation near cavities and holes, as well as models of propagation, dispersion and transformation of bulk, surface and normal elastic waves. The development of algorithms for fuzzy-set modeling in direct and inverse problems of the theory of resonant vibrations of plates, panels and cylinders, including taking into account the uncertainty factors of parameters in models of vibrations of thin multilayer graphene nanoplates and three-layer composite cylindrical panels. Theoretical algorithms for the analysis of models of fuzzy-multiple resonant-wave identification of mechanical characteristics of thin isotropic and nanocomposite functional-gradient plates using ultrasonic diagnostic data have been developed. The solutions of the problems of taking into account the uncertainty in obtaining estimates of the effects of heat transfer with a longitudinal flow around a high-temperature surface with a two-phase gas-liquid flow, with a flow of two-phase flows in cylindrical high-temperature channels and the interaction of a pulsating flow with a vibrating perforated wall, taking into account the injection of a refrigerant gas are presented.

Keywords: applied models, elastic and plastic deformation, uncertainty factors, scatter errors of exogenous parameters, theoretical research, methods of the theory of fuzzy sets, heuristic generalization principle, algorithms for determining endogenous parameters, software applications.