

ОТЗЫВ ОФИЦИАЛЬНОГО ОППОНЕНТА

на диссертационную работу Сторожева Сергея Валериевича

«Нечетко-множественные методы учета факторов неопределенности в математических моделях деформационных и тепловых процессов», представленную на соискание ученой степени доктора технических наук по специальности 05.13.18 – математическое моделирование, численные методы и комплексы программ (технические науки)

1. **Актуальность темы диссертационной работы.** Математические модели, лежащие в основе проектных расчетов для доминирующего ряда отраслей индустрии, в том числе в машиностроении, строительстве, приборостроении, имеют исходные параметры, значения которых устанавливаются экспериментально либо на основе обобщения субъективных экспертных заключений, отражающих опыт и компетенции специалистов. Данное соображение в самой высокой мере относится к прикладным моделям деформирования упругих тел и элементов конструкций, а также технологий термостабилизации с обладающими весьма высокой степенью разбросов исходными параметрами физико-механической и геометрической природы. Практика применения для учета этой неопределенности методов теории вероятностей и математической статистики, методов теории случайных процессов, на данный момент не решает в полной мере проблему учета эффектов неконтрастности значений экзогенных параметров указанных моделей ввиду трудностей получения обширных однородных частотных выборок таких данных, сложности учета субъективной экспертной информации, а также ввиду специфики практического применения указанных методов. Так, в частности, при вероятностном моделировании должны вводиться априорные гипотезы о типах частотных распределений для исходных и эндогенных неконтрастных данных; ввиду отсутствия аппарата арифметики частотных распределений, оперирование в процессе применения данных методов осуществляется с усредненными характеристиками и, соответственно, сопровождается частичной потерей информации о специфике неопределенности; реальное число подлежащих одновременному учету неконтрастных параметров при численной реализации моделей рассматриваемого типа достаточно ограничено, и преимущественно оценивается как ограниченное тремя.

Ввиду перечисленных соображений, представляемое в диссертационной работе исследование, посвященное развитию и программной реализации дополняющих спектр подходов к учету факторов неопределенности методов теории нечетких множеств для учета неконтрастности числовых значений исходных параметров в математических моделях деформационных и тепловых процессов, составляющих важнейший класс технологических расчетных моделей, может быть охарактеризовано как решение весьма актуальной научно-технической проблемы. О необходимости проведения данного исследования свидетельствует также представленный в диссертации анализ состояния научных разработок по рассматриваемой тематике.

2. **Степень обоснованности научных положений, выводов и рекомендаций работы.** Выносимые на защиту научные положения, а также сформулированные по итогам исследований выводы и рекомендации имеют достаточную степень обоснованности. По своему содержанию они характеризуют:

– круг моделей, исследованных в диссертации на основе разрабатываемых специализированных нечетко-множественных методов и алгоритмов их компьютерной реализации;

– специфику схем применения аппарата нечетких вычислений в рассматриваемых случаях, заключающуюся в фазификации неопределенных исходных параметров и расширении областей определения расчетных соотношений детерминистических версий соответствующих моделей на аргументы нечетко-множественного типа с фрагментирован-

ным поэтапным применением аппарата нечеткой арифметики и модифицированной альфа-уровневой версии эвристического принципа обобщения;

– реализацию и оценки эффективности используемого подхода при получении учитывающих неконтрастность экзогенных параметров числовых характеристик для моделей потери устойчивости, резонансных колебаний и волнового деформирования в тонкостенных конструкциях и упругих волноводах пространственного строения;

– реализацию и оценки эффективности используемого подхода применительно к моделям формирования зон пластических деформаций около отверстий и включений, туннельных полостей в геомассивах;

– применение разработанного подхода в качестве инструмента решения задач резонансно-волновой идентификации параметров тонкостенных конструктивных элементов технических устройств, физико-механических параметров конструктивных материалов и горных пород по обладающим разбросами данным ультразвуковой диагностики с получением описаний идентифицируемых характеристик в виде нечетких величин с устанавливаемыми функциями принадлежности;

– реализацию и оценки эффективности предложенных специализированных методов при исследовании математических моделей теплового экранирования, обтекания высокотемпературных поверхностей газожидкостными потоками и функционирования устройств распыления охлаждающих жидкостей в технических системах термостабилизации с учетом разбросов опытных и экспертных данных о характеристиках конструктивных материалов, жидкостей и газов;

– сферы практического применения разработанных алгоритмизированных методов для повышения адекватности оценок проектных ресурсов прочности, надежности и долговечности конструктивных элементов технических систем и подземных горно-шахтных сооружений при учете разбросов в значениях экзогенных физико-механических и геометрических параметров расчетных моделей.

Таким образом, научные положения, выводы и рекомендации работы являются достоверными мотивированными следствиями изложенных в диссертации исследований.

3. Достоверность и новизна научных положений, выводов и рекомендаций диссертационной работы. Подтверждением достоверности представленных в диссертации основных научных результатов, положений, выводов и рекомендаций, служат: корректное применение в работе теоретических основ и апробированных методов теории нечетких множеств, в первую очередь, аппарата нечетких вычислений в качестве методологической базы исследования; применение в работе комплекса строгих обоснованных математических методов анализа классических версий рассматриваемых моделей деформационных и термических процессов; использование в качестве базы для применения эвристического принципа расширения результатов анализа апробированных детерминистических версий математических моделей статического и динамического деформирования упругих тел, конструкций, сооружений, а также моделей технологических процессов термостабилизации; общая физическая непротиворечивость получаемых выводов и количественных оценок, и их соответствие данным опыта инженерной практики и экспериментальным данным; согласованность ряда частных результатов работы с соответствующими опубликованными результатами других исследований, включая полученные с применением вероятностного подхода; тестовая верификация программных приложений, созданных для численной реализации предложенных специализированных нечетко-множественных методов; данные практического внедрения разработанных методов и комплекса программных приложений.

К новым авторским результатам полученных в диссертационной работе исследований относятся:

– разработка специализированных методов и вычислительных алгоритмов нечетко-множественного исследования моделей резонансных колебаний, распространения волн деформаций и потери устойчивости для тонкостенных стержневых, пластинчатых и оболочечных конструкций с неопределенными параметрами;

– разработка и алгоритмизация специализированных нечетко-множественных методов анализа 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;

– разработка и алгоритмическая реализация специализированных методов 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;

– 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;

– разработка алгоритмизированных нечетко-множественных методов анализа моделей функционирования плоских гидроакустических экранов при учете неопределенности исходных данных о физико-механических и геометрических параметрах их компонентов;

– 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;

– разработка нечетко-множественных методов учета факторов неопределенности в моделях термостабилизации высокотемпературных поверхностей технических конструкций обтекающими газожидкостными потоками;

– разработка методов и алгоритмов нечетко-множественного анализа расчетных моделей многослойных тепловых экранов с неопределенными конструктивными характеристиками отражающих элементов.

Разработанные методы характеризуются смягченными требованиями к характеру неконтрастной исходной информации, включая возможности использования данных субъективных экспертных заключений и маломощных частотных выборок экспериментальных замеров.

4. Теоретическое и прикладное практическое значение результатов диссертации. Теоретическое значение диссертационного исследования заключается в разработке концепции применения аппарата теории нечетких множеств и вычислений для решения проблемы учета факторов неопределенности в математических моделях деформационных и тепловых процессов, в создании комплекса специализированных эффективных теоретически обоснованных численно-аналитических нечетко-множественных методов для решения новых классов научных задач данного типа с неконтрастными, обладающими разбросами числовых значений исходными параметрами физико-механической и геометрической природы.

Прикладная практическая ценность результатов применения разработанных в диссертации методов и созданного для их реализации комплекса программных приложений заключается в том, что их использование:

– в проектных разработках позволяет повысить достоверность оценок ресурсов прочности, надежности и функциональности тонкостенных конструктивных элементов балочного, пластинчатого и оболочечного типа в машинах, приборах и строительных со-

оружениях, 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;

– 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;

– позволяет точнее оценивать характеристики прочности и надежности деталей машин, приборов и сооружений в виде пластин, панелей и цилиндров, работающих в условиях резонансных упругих колебаний и вибрационных нагружений широких частотных диапазонов;

– обеспечивает повышение степени соответствия результатов идентификации геометрических и физико-механических характеристик конструкций в виде тонких изотропных и нанокompозитных функционально-градиентных пластин с использованием данных ультразвуковой диагностики реальным свойствам объектов;

– позволяет повысить 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 при учете разбросов значений экзогенных параметров моделирования;

– позволяет в процессе конструирования плоских гидроакустических экранов добиваться необходимой меры стабильности показателей интенсивности отраженных и генерируемых за экраном волновых сигналов при учете неопределенности исходных данных;

– позволяет повысить адекватность оценок для параметров факела распада струи жидкости в пневматических и ротационных дисковых распылителях устройств воздушно-капельного охлаждения, и траекторий движения капель распыляемой жидкости при проектировании технических устройств систем термостабилизации;

– позволяет получать более адекватных инженерной практике рекомендации по выбору режимов охлаждения потоками аэрозолей, параметров дисперсности парожидкостной фракции и скоростей обтекания в технологиях термостабилизации высокотемпературных поверхностей обтекающими газопаровыми потоками;

– позволяет в проектных расчетах определять параметры пакетов тонких мембранных элементов теплоотражающих экранов, более адекватные реальным эксплуатационным условиям и обеспечивающие заданные показатели эффективности экранирования тепловых излучений в технических системах.

Ряд результатов работы внедрен в практику проектных расчетов (АО «Научно-исследовательский институт вычислительных комплексов им. М.А. Карцева», г. Москва – расчеты параметров нанорезонаторов, ультразвуковых линий задержки и фильтров на поверхностных акустических волнах; ГУ «Республиканский академический научно-исследовательский и проектно-конструкторский институт горной геологии, геомеханики, геофизики и маркшейдерского дела», г. Донецк – обработка геоакустической информации о свойствах массивов горных пород с выработками). Результаты диссертации также использованы в учебном процессе для студентов направления подготовки «Системный анализ и управление» (Донецкий национальный университет).

5. Соответствие диссертационного исследования паспорту научной специальности и требованиям Положения о порядке присуждения ученых степеней. Научные

результаты и выводы диссертации, а также вынесенные на защиту положения по своему содержанию соответствуют паспорту специальности 05.13.18 – Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ (технические науки), включая области 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».

Полученные в диссертационной работе результаты отражены с необходимой степенью полноты в 44 опубликованных научных работах автора, в том числе в 1 монографии, 13 статьях в научно-технических журналах, включенных в перечни ВАК ДНР и ВАК РФ, 14 статьях в изданиях, представленных в НБД Web of Science, Scopus, MathSciNet, и в 16 публикациях в других изданиях.

Результаты работы прошли апробацию на 27 Международных научных и научно-технических конференциях, а также на ряде научных семинаров в вузах и научных учреждениях.

Охарактеризованный вклад автора в совместно выполненные работы, позволяет заключить, что основные представленные в диссертации результаты получены лично С.В. Сторожевым. Стил изложения результатов в диссертационной работе, не вызывает замечаний, а объем диссертации и автореферата отвечают имеющимся нормам. Автореферат диссертационной работы в необходимой мере представляет ее общие характеристики и отражает содержание проведенных исследований.

Уровень новизны полученных результатов исследования, степень их значимости в теоретическом и прикладном аспектах, а также мера обоснованности выносимых на защиту научных положений отвечают требованиям, установленным для диссертаций на соискание ученой степени доктора технических наук.

6. Замечания по диссертационной работе и ее автореферату.

1. Используемые в работе модификации процедуры применения альфа-уровневой формы эвристического принципа обобщения при переходе к нечетко-множественным аргументам в расчетных соотношениях рассматриваемых моделей не охарактеризована возможность исключения переменных из пространства поиска экстремальных значений в случаях, когда рассматриваемая как неконтрастная переменная линейно входит в соответствующее расчетное соотношение.

2. Уместным было бы дать в работе более развернутую характеристику приведенных в разделе 1 рекомендаций по выбору типа нечетко-множественных представлений, заданию типов функций принадлежности для неконтрастных экзогенных параметров различных рассматриваемых в диссертации моделей.

3. В работе не представлены данные численных экспериментов по реализации рассматриваемой в разделе 4 методики нечетко-множественной волновой идентификации физико-механических характеристик водонасыщенных горных пород.

4. Применительно к проблемам учета разброса параметров при описании процессов рассеивания жидкости ротационными дисковыми распылителями устройств воздушно-капельного охлаждения в разделе 6 работы рассмотрена только модель вертикально вращающегося распылителя.

5. Не во всех рассматриваемых в диссертации задачах по разработке нечетко-множественных методов теоретических моделей тепловых процессов представлены этапы вычислительных экспериментов, что, в частности, суживает базу для формирования конкретных выводов об эффективности применения разрабатываемого подхода.

