

Результаты публичной защиты

Дата защиты: 19 декабря 2019 г.

Соискатель: **Казаков Александр Олегович.**

Диссертация на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук на тему: «Численное моделирование волновых процессов в задачах ультразвукового неразрушающего контроля сеточно-характеристическим методом».

Специальность 05.13.18 – «Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ».

На заседании председательствует – Председатель диссертационного совета, академик РАН, д.ф.-м.н., профессор Б.Н. ЧЕТВЕРУШКИН.

Ученый секретарь – к.ф.-м.н. М.А. КОРНИЛИНА.

На заседании из 25 членов диссертационного совета присутствовали 18 чел., из них 6 докторов по профилю рассматриваемой диссертации:

1.	ЧЕТВЕРУШКИН Б.Н.	д.ф.-м.н.	05.13.18
2.	ТИШКИН В.Ф.	д.ф.-м.н.	01.01.07
3.	КАЛИТКИН Н.Н.	д.ф.-м.н.	01.02.05
4.	КОРНИЛИНА М.А.	к.ф.-м.н.	05.13.18
5.	ГОЛОВИЗНИН В.М.	д.ф.-м.н.	01.02.05
6.	ДОЛГОЛЕВА Г.В.	д.ф.-м.н.	01.01.07
7.	ЕЛИЗАРОВА Т.Г.	д.ф.-м.н.	01.01.07
8.	ЗМИТРЕНКО Н.В.	д.ф.-м.н.	01.02.05
9.	КАРАМЗИН Ю.Н.	д.ф.-м.н.	01.01.07
10.	КОВАЛЕВ В.Ф.	д.ф.-м.н.	05.13.18
11.	КОЗЛОВ А.Н.	д.ф.-м.н.	01.02.05
12.	КОЛЕСНИЧЕНКО А.В.	д.ф.-м.н.	01.02.05
13.	КУЛЕШОВ А.А.	д.ф.-м.н.	05.13.18
14.	ЛУЦКИЙ А.Е.	д.ф.-м.н.	01.02.05
15.	МИХАЙЛОВ А.П.	д.ф.-м.н.	05.13.18
16.	ПЕТРОВ И.Б.	д.ф.-м.н.	01.02.05
17.	ШПАТАКОВСКАЯ Г.В.	д.ф.-м.н.	05.13.18
18.	ЯКОВОВСКИЙ М.В.	д.ф.-м.н.	05.13.18

По результатам публичной защиты диссертационный совет принял следующее заключение:

ЗАКЛЮЧЕНИЕ ДИССЕРТАЦИОННОГО СОВЕТА Д 002.024.03,
СОЗДАННОГО НА БАЗЕ
ФЕДЕРАЛЬНОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО УЧРЕЖДЕНИЯ
«ФЕДЕРАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ЦЕНТР ИНСТИТУТ
ПРИКЛАДНОЙ МАТЕМАТИКИ ИМ. М.В. КЕЛДЫША РАН»
МИНИСТЕРСТВА НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
ПО ДИССЕРТАЦИИ НА СОИСКАНИЕ
УЧЕНОЙ СТЕПЕНИ КАНДИДАТА НАУК

аттестационное дело № _____

решение диссертационного совета от 19.12.2019 № 10

О присуждении **Казакову Александру Олеговичу**, гражданину Российской Федерации ученой степени кандидата физико-математических наук.

Диссертация «Численное моделирование волновых процессов в задачах ультразвукового неразрушающего контроля сеточно-характеристическим методом» по специальности 05.13.18 – «Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ» принята к защите 17.10.2019 (протокол заседания № 10/пз) диссертационным советом Д 002.024.03 на базе Федерального государственного учреждения «Федеральный исследовательский центр Институт прикладной математики им. М.В.Келдыша Российской академии наук». Адрес организации: 125047, Москва, Миусская пл., д.4. Диссертационный совет утвержден приказом Минобрнауки России №105/нк от 11 апреля 2012 года.

Соискатель Казаков Александр Олегович, 1992 года рождения, в 2016 году окончил федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет)», факультет аэрофизики и космических исследований, в 2019 году окончил очную

аспирантуру МФТИ, факультет управления и прикладной математики, работает в должности ассистента кафедры информатики и вычислительной математики МФТИ.

Диссертация выполнена на кафедре информатики и вычислительной математики федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет)», Министерство науки и высшего образования Российской Федерации.

Научный руководитель – Васюков Алексей Викторович, кандидат физико-математических наук, доцент кафедры информатики и вычислительной математики МФТИ, технический директор ООО «Ай Ти Ди Системс».

Официальные оппоненты:

Левин Владимир Анатольевич, доктор физико-математических наук, профессор кафедры «Вычислительная механика» механико-математического факультета, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Московский государственный университет имени М.В.Ломоносова»;

Терехов Кирилл Михайлович, кандидат физико-математических наук, научный сотрудник ВНК №2 Института вычислительной математики им. Г.И. Марчука Российской академии наук

дали положительные отзывы на диссертацию.

Ведущая организация – Автономная некоммерческая организация высшего образования "Университет Иннополис" в своем положительном отзыве, подписанном кандидатом физико-математических наук **Холодовым Ярославом Александровичем**, заведующим лабораторией анализа данных и биоинформатики, и утвержденном ректором АНО ВО "Университет Иннополис", доктором физико-математических наук **Тормасовым Александром Геннадьевичем**, указала, что диссертация представляет собой целостное научное исследование на актуальную тему, в котором получен ряд

новых результатов в области применения сеточно-характеристического метода. Результаты, изложенные в работе, представляют научную ценность и вносят вклад в развитие современных методов численного расчёта волновых задач.

Соискатель имеет 7 опубликованных работ, все по теме диссертации, из них 5 работ опубликованы в рецензируемых научных изданиях, рекомендованных ВАК и/или входящих в международные системы цитирования.

Наиболее значимые научные работы соискателя по теме диссертации:

1. К вопросу расчёта граничных и контактных узлов в сеточно-характеристическом методе на непериодических тетраэдральных сетках / А. О. Казаков // Сиб. журн. вычисл. матем. — 2018. — Т. 21, № 4. — С. 375—391
2. Grid-Characteristic Numerical Method for Low-Velocity Impact Testing of Fiber-Metal Laminates / K. Beklemysheva, A. Vasyukov, A. Kazakov, I. Petrov // Lobachevskii J Math. — 2018. — Vol. 39, no. 7. — P. 874—883
3. Transcranial ultrasound of cerebral vessels in silico: proof of concept / Y. Vassilevski, K. Beklemysheva, G. Grigoriev, A. Kazakov, N. Kulberg, I. Petrov, V. Salamatova, A. Vasyukov // Russian Journal of Numerical Analysis and Mathematical Modelling. — 2016. — Vol. 31, no. 5. — P. 317—328
4. О численном моделировании волновых процессов в анизотропных средах / И. Б. Петров, А. В. Фаворская, А. В. Васюков, А. С. Ермаков, К. А. Беклемышева, А. О. Казаков, А. В. Новиков // Доклады Академии Наук. — 2014. — Т. 495, № 3. — С. 285—287
5. Numerical Modelling of Composite Delamination and Non-destructive Testing / K. Beklemysheva, A. Vasyukov, A. Kazakov, A. Ermakov // Innovations in Wave Processes Modelling and Decision Making: Grid-Characteristic Method and Applications / ed. by A. Favorskaya, I. Petrov. — Springer International Publishing, 2018. — (SmartInnovation, Systems and Technologies) – P. 161-185.

Общий объём работ в изданиях из перечня ВАК – 8 п.л., авторский вклад– 3,6 п.л.

Работа [1] выполнена соискателем без соавторов. В ней проводится анализ сложностей применения сеточно-характеристического метода к существенно неперiodическим тетраэдральным сеткам и предлагаются модификации метода для их преодоления. В работах [2, 4] соискателем предложен и программно реализован численный метод для выполнения расчётов. В них сеточно-характеристический метод применяется для моделирования распространения упругих волн при низкоскоростном воздействии на различные конфигурации композиционных материалов. В работе [3] выполняется моделирование УЗИ головы человека в разных аспектах. Соискателем выполнено прямое численное моделирование распространения ультразвуковых волн в голове при проведении УЗИ, для чего в том числе разработаны модификации численного метода, которые позволили выполнить расчёты, бывшие ранее неустойчивыми. В работе [5] соискателем предложена модель процесса неразрушающего контроля полимерных композитных материалов и выполнены расчёты с использованием данной модели.

В диссертации все сведения о публикациях соискателя достоверны.

На автореферат и диссертацию поступили отзывы ведущей организации, отзывы оппонентов и 2 отзыва на автореферат. Все отзывы положительные. Отзывы содержат ряд замечаний:

В отзыве официального оппонента, д.ф.-м.н. Левина В.А.:

1. В пункте 1.2.4 модель акустики вводится как упрощение модели упругости, однако несмотря на сходный вид окончательных уравнений, строго говоря, уравнения модели акустики выводятся из других соображений и не являются частным случаем модели упругости.
2. Замечание в пункте 2.3 насчёт отсутствия в сетке, являющейся триангуляцией Делоне, ячеек, близких к вырожденным, неверно.

3. Количество верификационных расчётов, представленных в работе, достаточно небольшое, кроме того, большинство из них выполнены для одномерных задач. Стоило бы представить в работе тестовый расчёт трёхмерной постановки с исследованием сходимости, а также продемонстрировать сходимость для результатов моделирования в биологических тканях.

4. В диссертации нет упоминания о получении свидетельства на программу для ЭВМ для созданного программного комплекса.

5. Замечание по тексту автореферата: на стр. 20 автореферата опечатка в слове «проведён»

В отзыве официального оппонента, к.ф.-м.н. Терехова К.М.:

1. В диссертационной работе встречаются опечатки и непонятная терминология (Некурантовский шаг).

2. Во введении отсутствует обзор по смежным работам в области численных методов и не приведены преимущества применения сеточно-характеристического метода перед другими методами.

3. Представленные в главе 5.1 результаты верификации не позволяют судить о порядке сходимости метода на неструктурированных сетках в областях сложной формы.

В отзыве ведущей организации:

1. При том, что в работе используются как тетраэдральные, так и кубические сетки, было бы полезно выполнить сравнение скорости расчёта и точности решения на различных сетках, например, для представленной в работе модельной задачи о распространении продольной волны в твёрдом теле кубической формы в результате удара по боковой поверхности.

2. Также разумно было бы использовать для моделирования волновых процессов в композиционных материалах в связи с их правильной прямоугольной формой структурированных кубических сеток с переходом к неструктурированным тетраэдральным на существующих

внутренних дефектах. Ввиду особенностей реализации сеточно-характеристического метода это позволило бы значительно сэкономить вычислительные ресурсы и повысить точность проводимых расчетов. Тем более что автор реализовал оба варианта расчета в своем программном комплексе.

3. Приведённое в разделе 4.2 диссертации описание возможностей архитектуры систем, реализуемых на динамических интерпретируемых языках программирования, представляется излишним, поскольку не было реализовано автором в ходе разработки вычислительного программного комплекса.

Отзывы на автореферат дали Половнев Антон Леонидович, к.ф.-м.н, ведущий научный сотрудник ПАО «РКК «Энергия» и Голован Владимир Иванович, к.т.н, заместитель начальника НИО-3, ФГУП «ЦАГИ».

В них имеются следующие замечания:

1. В описании содержания второй главы не акцентировано её место и взаимосвязи с выполненной научной работой (Половнев А.Л.);

2. Целесообразно было бы привести результаты расчётов с использованием нового метода не только для композитных конструкций, но и для металлических (Голован В.И.);

3. В работе не приведены данные по вычислительным ресурсам, требуемым для расчёта, и по времени выполнения расчёта реальных конструкций. Для потенциального практического применения результатов работы данные характеристики программного комплекса были бы крайне интересны (Голован В.И.).

Другие замечания связаны с оформлением автореферата:

4. В иллюстративных материалах не приведены размерности физических величин (Половнев А.Л.);

5. На некоторых графиках не «оцифрованы» оси (Половнев А.Л.);

В целом отзывах отмечается, что указанные замечания не являются принципиальными и не снижают общей ценности работы. Основные

результаты работы в достаточной мере отражены в публикациях и изданиях из перечня ВАК, прошли апробацию на многочисленных международных и всероссийских конференциях и семинарах. Работа ясно изложена и хорошо оформлена. По актуальности решаемой проблемы, научной новизне, научной и практической значимости, достоверности научных результатов диссертация удовлетворяет требованиям п.9 Положения о присуждении ученых степеней, предъявляемым к кандидатским диссертациям, а ее автор заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук.

Выбор официальных оппонентов и ведущей организации объясняется их широко известной компетенцией в вопросах математического моделирования задач механики деформируемого твёрдого тела и разработки численных методов, что подтверждается многочисленными научными публикациями, такими как:

1. **Левин В.А.** Равновесие микрополярных тел с предварительно деформированными областями. Наложение больших деформаций // 2017, Прикладная математика и механика, том 81, № 3, с. 330-336

2. **Terekhov K., Vassilevski Y.** FINITE VOLUME METHOD FOR COUPLED SUBSURFACE FLOW PROBLEMS, I: DARCY PROBLEM. Journal of Computational Physics. 2019. T. 395. C. 298-306.

3. **Y.A. Kholodov.** Development of network computational models for the study of nonlinear wave processes on graphs // Computer Research and Modeling. 2019. 11(5), 777-814.

Диссертационный совет отмечает, что на основании выполненных соискателем исследований:

- **разработана** математическая модель ультразвукового неразрушающего контроля изделий из полимерных композиционных материалов для ультразвуковых исследований в медицине в рамках модели линейной упругости в приближении малых деформаций;

- **предложена** новая версия сеточно-характеристического метода для расчётов на существенно неперiodических тетраэдральных расчётных сетках, что позволяет проводить расчёты в областях со сложными криволинейными границами;

- **создан** параллельный программный комплекс на C++, реализующий разработанный метод и модели изотропного и анизотропного упругого тела и акустики на периодических прямоугольных и неперiodических тетраэдральных и треугольных расчётных сетках.

- **проведены** расчёты ряда задач ультразвуковой диагностики, часть из которых удалось решить сеточно-характеристическим методом благодаря предложенным соискателем модификациям метода.

Теоретическая значимость исследования обоснована тем, что:

изучены неисследованные ранее причины неустойчивости сеточно-характеристического метода при применении к существенно неперiodическим расчётным сеткам,

- проанализированы конкретные недостатки классической версии метода, для каждой предложены модификации.

Значение полученных соискателем результатов исследования для практики состоит в том, что предложенные модификации численного метода позволили решить ряд задач, для которых расчёты на основе классической версии сеточно-характеристического метода являются неустойчивыми.

На основе предложенного метода создан программный комплекс, позволяющий проводить моделирование большого круга задач ультразвукового неразрушающего контроля и прошедший верификацию сравнением с экспериментом. Данный программный комплекс может быть применён в научно-исследовательских институтах авиационного и медицинского направления для развития техник ультразвуковой диагностики и анализа волнового отклика исследуемого объекта и используемого прибора в конкретных случаях диагностики.

Оценка **достоверности** результатов исследования выявила хорошее подтверждение результатов при их сопоставлении с имеющимися теоретическими и экспериментальными данными. При разработке математических моделей и методов автор применяет обоснованные теоретические выводы и строгий математический аппарат. Выполнен ряд верификационных расчётов, проведено сравнение с экспериментом для задачи ультразвукового неразрушающего контроля композитной панели.

Личный вклад соискателя состоит в разработке математических моделей для задач ультразвуковой диагностики, разработке новой версии сеточно-характеристического метода для расчётов на неперiodических тетраэдральных сетках, создании на этой основе комплекса программ, проведении расчетов, интерпретации всех полученных результатов, в том числе подготовке презентаций и публикаций по результатам выполненных работ.

Диссертационный совет пришел к выводу о том, что диссертация соискателя Казакова Александра Олеговича представляет собой законченную научно-квалификационную работу, содержащую решение актуальных практических задач и вносящую существенный вклад в развитие численного моделирования в области динамических задач механики деформируемого твёрдого тела. По актуальности, научной новизне, теоретической и практической значимости диссертация соответствует требованиям Положения «О порядке присуждения ученых степеней», предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени кандидата наук. По своему содержанию диссертация отвечает паспорту специальности 05.13.18 - «Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ».

На заседании 19.12.2019 диссертационный совет принял решение присудить Казакову Александру Олеговичу ученую степень кандидата

физико-математических наук по специальности 05.13.18 - «Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ».

При проведении тайного голосования диссертационный совет в количестве 18 человек, из них 6 докторов наук по специальности рассматриваемой диссертации, участвовавших в заседании, из 24 человек, входящих в состав совета, проголосовали: за 18, против - нет, недействительных бюллетеней - нет.

Председатель

диссертационного совета Д 002.024.03

Б.Н. Четверушкин

Ученый секретарь

диссертационного совета Д 002.024.03

М.А. Корнилина

19 декабря 2019 г.