

## ОТЗЫВ ОФИЦИАЛЬНОГО ОППОНЕНТА

профессора, доктора физико-математических наук, заслуженного деятеля науки РФ  
Левина Владимира Анатольевича

на диссертационную работу Казакова Александра Олеговича

«Численное моделирование волновых процессов в задачах ультразвукового  
неразрушающего контроля сеточно-характеристическим методом»,

представленную на соискание учёной степени кандидата физико-математических  
наук по специальности 05.13.18 – «Математическое моделирование, численные  
методы и комплексы программ»

**Актуальность исследования.** Ультразвуковая диагностика имеет большое значение в задачах техники и медицины. Численное моделирование распространения волн в исследуемом образце и в деталях прибора должно упростить интерпретацию результатов диагностики. Поэтому являются актуальными разработка математических моделей процессов ультразвуковой диагностики для различных методик и режимов такой диагностики, применяемых в технике и медицине, развитие численных методов решения задач ультразвуковой диагностики и создание программного комплекса, позволяющего решать эти задачи в различных постановках.

В работе используются модели акустических волн в идеальной сжимаемой жидкости (эта модель называется в работе моделью акустики), в анизотропном упругом твердом теле, а также в упругопластических и вязкоупругих телах в приближении малых деформаций. Системы уравнений для этих моделей решаются численно с использованием сеточно-характеристического метода. Для областей интегрирования прямоугольной формы используется классическая версия сеточно-характеристического метода на прямоугольных расчётных сетках, предложенная в работе Петрова И.Б. и Холодова А.С. (№ 24 в списке литературы) и с тех пор хорошо себя зарекомендовавшая. Для областей интегрирования более сложной формы используется версия сеточно-характеристического метода для треугольных

и тетраэдральных сеток, предложенная в работе Челнокова Ф.Б. (№ 28 в списке литературы). Анализируются проблемы данной версии метода при большой нерегулярности сетки и предлагаются модификации метода для их преодоления. Проведены расчёты для различных вариантов постановки задачи моделирования ультразвуковых исследований.

**Общая характеристика работы.** Диссертация состоит из введения, 5 глав, заключения и списка литературы. Полный объём диссертации составляет 121 страницу, включая 50 рисунков и 3 таблицы. Список литературы содержит 57 наименований.

Во введении обоснована актуальность и практическая значимость работы, обозначены цели, определена научная новизна, изложены основные положения, выносимые на защиту, определён личный вклад соискателя в полученные результаты.

В первой главе описана математическая модель волновых процессов в деформируемых твёрдых телах в приближении малых деформаций и с учётом возможной анизотропии материала. Рассмотрены некоторые частные виды анизотропии, рассмотрены простейшие модели пластического течения и вязкости.

Во второй главе изложены общие подходы к численному моделированию, реализованные в работе: идея расщепления по физическим процессам, некоторые подходы к реализации движения расчётной сетки, некоторые подходы к реализации простейших моделей вязкости и пластичности.

В третьей главе рассмотрен сеточно-характеристический метод, как в общем случае, так и в применении к непериодическим треугольным и тетраэдральным расчётным сеткам, проанализированы имеющиеся сложности при применении классической версии метода для регулярных сеток, предложены модификации метода для их преодоления.

В четвёртой главе описан созданный программный комплекс, изложены идеи архитектуры комплекса, обеспечивающие его расширяемость по типам

математических моделей, расчётных сеток и численных методов без потери вычислительной эффективности, обсуждены плюсы и минусы применённой методики разработки единой программы на языке C++ по сравнению с методикой создания набора утилит, комбинируемых через язык Python.

В пятой главе представлены результаты применения программного комплекса для моделирования процессов ультразвуковой диагностики с использованием различных вариантов постановки задачи. Представлено сравнение результатов моделирования неразрушающего контроля пластины из авиационной обшивки с экспериментом. Представлен расчёт в гетерогенной области с существенно криволинейными поверхностями границ и контактов – моделирование постановки медицинской ультразвуковой диагностики.

В заключении сведены результаты работы, указаны возможные направления для дальнейшего развития.

**По теме работы опубликовано пять статей в изданиях из перечня ВАК, из которых одна без соавторов, и две статьи в изданиях не из перечня ВАК.**

**Научная новизна.** Результаты, представленные в диссертации, являются новыми. Основной результат работы состоит в том, что были подробно разобраны неисследованные ранее причины неустойчивости сеточно-характеристического метода на границах и контактах областей интегрирования при их существенной криволинейности и на основе этого анализа предложено несколько модификаций метода, которые позволили добиться устойчивости ряда расчётов. Во-первых, рассмотрена возможность вырождения матрицы граничного корректора в зависимости от угла между нормалью к границе и направлением расчёта. Для того, чтобы метод не был к этому чувствителен, предложен способ поддержки согласованности граничных и контактных условий на каждом шагу расчёта. Во-вторых, предложен метод обработки случаев на криволинейной границе области интегрирования, когда число выпавших из области интегрирования характеристик не является нормальным для метода. В-третьих, показана желательность расчёта на тетраэдральных сетках с шагом больше шага по классическому правилу

Куранта и разобраны возникающие при этом нюансы в реализации метода. В-четвёртых, предложено случайное вращение расчётного базиса на каждом шагу по времени, которое дополнительно сглаживает нефизичные артефакты решения на границах и контактах.

**Ценность и практическая значимость полученных результатов.** Научная значимость работы состоит в том, что впервые удалось применить сеточно-характеристический метод к расчётам на существенно неперiodических тетраэдральных расчётных сетках – без использования предложенных в работе модификаций метода он был неустойчив на ряде расчётов, таких как представленное в секции результатов моделирование УЗИ головы человека.

Практическая значимость работы состоит в создании математической модели процесса ультразвуковых исследований, созданный на основе которой программный комплекс позволяет производить численное моделирование процессов ультразвуковой диагностики для различных постановок задач техники и медицины, в том числе для моделирования анизотропных материалов, и допускает дальнейшее расширение на более широкий класс задач. Программный комплекс был верифицирован сравнением с экспериментом по ультразвуковому неразрушающему контролю композитной панели обшивки самолёта.

#### **Замечания по тексту диссертации:**

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.

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

Приведённые замечания не снижают ценности работы. Исследуемые в работе задачи являются актуальными, подходы к их решению – ясно изложенными и обоснованными. Результаты обладают научной новизной и практической ценностью.

**Соответствие содержания диссертации специальности.** Содержание и результаты работы полностью соответствуют паспорту специальности 05.13.18 – «Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ», поскольку основными результатами работы являются математическая модель процесса ультразвуковой диагностики, обновлённая версия сеточно-характеристического метода на непериодических тетраэдральных сетках и программный комплекс для моделирования волновых процессов при ультразвуковых исследованиях.

**Заключение.** Диссертационная работа является законченным научным исследованием и полностью соответствует требованиям Положения о присуждении ученых степеней, утвержденного постановлением Правительства РФ от 24 сентября 2013 г. №842, а её автор, Казаков Александр Олегович, заслуживает присуждения ему учёной степени кандидата физико-математических наук по специальности 05.13.18 – «Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ».

**Официальный оппонент** – Левин Владимир Анатольевич, доктор физ.-мат. наук, профессор, профессор кафедры «Вычислительная механика» механико-математического факультета МГУ им. Ломоносова

«29» ноября 2019 г.



Левин В. А.

Адрес организации: 119991, Москва, ГСП-1, Ленинские горы, д.1, механико-математический факультет, тел.: 8 (495) 939-10-00, e-mail: v.a.levin@mail.ru

Личную подпись д.ф-м.н. Левина В.А. заверяю

Верушев спец. о.к. Морозов

Должность, Ф.И.О., подпись, печать

