

## ОТЗЫВ ОФИЦИАЛЬНОГО ОППОНЕНТА

кандидата физико-математических наук Терехова Кирилла Михайловича

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»

Диссертация Казакова А.О. «Численное моделирование волновых процессов в задачах ультразвукового неразрушающего контроля сеточно-характеристическим методом» **посвящена** разработке математической модели ультразвуковой диагностики в неоднородной среде и построению программного комплекса на основе сеточно-характеристического метода для ее численного решения. Автором рассмотрены теоретические сложности, возникающие при применении метода для объектов сложной формы, заданных неструктурированной расчетной сеткой, с гетерогенными свойствами материала. Успешная модификация сеточно-характеристического метода и его реализация в параллельном программном комплексе позволила автору получить впечатляющие результаты по воспроизведению натуральных экспериментов, имеющих практическую значимость и представленных в главах 5.2 и 5.3.

Структура диссертации включает введение, пять глав, заключение и список литературы.

Во введении обоснована практическая ценность и актуальность работы, поставлены цели, описана научная новизна и личный вклад соискателя в полученные результаты. На защиту выносятся пять основных положений.

Первая глава посвящена описанию используемых математических моделей. Процесс ультразвуковой диагностики моделируется как распространение упругих волн в упругих телах в приближении малых деформаций.

Вторая и третья главы посвящены описанию используемого численного метода, основное внимание уделяется вопросам адаптации сеточно-характеристического метода к расчётам на неструктурированных тетраэдральных сетках. Указано несколько причин, по которым применение версии метода для регулярных сеток к тетраэдральным сеткам в областях с криволинейными границами может приводить к неустойчивости. Для каждой причины предложены модификации метода, направленные на их преодоление. Даны интересные рекомендации по построению сеточно-характеристического метода в конечно-объёмной формулировке.

В четвёртой главе даётся описание архитектуры программного комплекса, реализующего численный метод. Приведены диаграммы классов, обсуждается проблема обеспечения расширяемости программного комплекса по типам моделей реологии, расчётных сеток и численных методов при сохранении его вычислительной эффективности.

Пятая глава демонстрирует результаты применения созданного программного комплекса к различным расчётным постановкам. Приводится ряд тестовых расчётов, которые включают несколько расчётов для установок ультразвукового неразрушающего контроля полимерных композиционных материалов обшивки самолёта и расчёт ультразвукового исследования головы человека. Для расчета неразрушающего контроля композитов проведено сравнение численных результатов с натурным экспериментом.

Разработка датчиков структурной целостности является востребованной и **актуальной темой** в инженерных задачах и вызвана вопросами безопасности и рентабельности. Исследования в области возможных подходов к моделированию датчиков контроля целостности структур проводятся в самых передовых научных центрах Германии и США. Таким образом, предложенный автором программный комплекс находится на уровне мировых аналогов, которые, как правило, основаны на лагранжевых конечно-элементных формулировках. Таким образом, **новизну** работы составляют теоретические разработки в области устойчивости сеточно-характеристического метода на неструктурированных сетках, которые позволили

впервые применить сеточно-характеристический метод для построения подобного программного комплекса. **Обоснованность и достоверность** полученных результатов обеспечивает сравнение решения, полученного при помощи предложенного численного метода, как с аналитическим решением, так и с результатами эксперимента.

**Соответствие содержания диссертации специальности.** Содержание и результаты работы полностью соответствуют паспорту специальности 05.13.18 – «Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ»: основными результатами работы являются математическая модель ультразвуковой диагностики, предложенные модификации сеточно-характеристического численного метода и программный комплекс, реализующий данный метод.

**Замечания.** Диссертационная работа не лишена недостатков, в частности:

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.

**Итоговая оценка работы.** Сделанные замечания имеют рекомендательный характер и не снижают ценности полученных результатов. Рассмотренные в работе задачи и используемые методы их решения актуальны, в полученных результатах есть новизна и практическая значимость.

Автореферат соответствует основному содержанию диссертации.

Диссертационная работа 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** – Терехов Кирилл Михайлович, кандидат физ.-мат. наук, научный сотрудник ВНК №2 ИВМ РАН

«28» ноября 2019 г.



Терехов К.М.

Адрес организации: 119333, г. Москва, ул. Губкина, 8,

тел.: 8 (495) 984-81-20,

e-mail: kirill.terehov@gmail.com

Личную подпись к.ф.-м.н. Терехова К.М. заверяю

Шутяев В.П., д.ф.-м.н., ученый секретарь ИВМ РАН

