

ОТЗЫВ

официального оппонента Каледина Валерия Олеговича
на диссертацию Вагина Дениса Владимировича
«Методы и реализующее их программное обеспечение для решения
трехмерных прямых и обратных задач геоэлектromагнетизма,
термоупругости и многофазной фильтрации», представленную на соискание
ученой степени доктора технических наук по специальности 05.13.18 –
Математическое моделирование, численные методы
и комплексы программ

Актуальность темы диссертации. Потребность исследования взаимозависимых процессов различной физической природы в пространственных объектах сложной геометрии и топологии актуальна для различных отраслей технических и естественных наук и наукоёмкой промышленности, в том числе – в машиностроении, геофизике и геологии, разработке подземных месторождений, транспортировке полезных ископаемых и т.д. Важнейшую роль в таких исследованиях играет цифровое моделирование. К настоящему времени разработаны многочисленные математические модели частных физических процессов и реализовано программное обеспечение для их цифрового моделирования; однако рациональное сопряжение моделей разнородных процессов в одном и том же объекте представляет значительные трудности, которые приходится преодолевать при разработке программных комплексов, предназначенных для комплексных исследований. Несмотря на наличие ряда исследовательских комплексов, предназначенных для решения сопряжённых и связанных задач моделирования, зачастую они требуют чрезмерно высоких затрат вычислительных ресурсов, а продолжительность одного расчёта для сложных объектов может составлять десятки и сотни часов.

Поэтому тема диссертации Д.В. Вагина, в которой решается проблема моделирования частного, но важного для приложений набора взаимосвязанных процессов и явлений – геоэлектromагнетизма, термоупругости и фильтрации в многофазной среде, в неоднородных областях с криволинейными границами и переменными в пространстве направлениями анизотропии, представляется **актуальной**.

Содержание работы. Диссертация объемом 300 страниц состоит из введения, 6 глав, заключения, списка использованных источников из 274 наименований и двух приложений, содержит 131 рисунок и 19 таблиц.

Главы диссертации структурированы по признаку изучаемых процессов и содержат основные компоненты изложения, относящиеся к предметной об-

ласти главы: анализ известных результатов, построение математических моделей и численных схем, исследование и верификацию численных решений.

Глава 1 содержит описание математических моделей, постановок задач и численных схем в области моделирования трёхмерных электромагнитных полей в сложно построенных массивах горных пород. Проанализированы математические модели и известные вариационные постановки краевых задач, сделан вывод о перспективности построения методов решения на основе двойного выделения поля источника. Предложено ввести в алгоритм решения прямой задачи электроразведки в качестве отдельного этапа решение вспомогательной задачи на топологически подобной горизонтально-слоистой области для компенсации погрешности решения исходной трёхмерной задачи. Построены вычислительные схемы как для временной, так и для частотной области. Показан пятикратный выигрыш в вычислительной эффективности перед известными конечно-элементными схемами, что позволяет использовать предложенные методы и алгоритмы решения прямой задачи при решении обратных задач.

В главе 2 та же логика применена к описанию моделирования фильтрации многофазных флюидов в неоднородных массивах с анизотропной проницаемостью (ориентированной трещиноватостью). В задаче фильтрации многофазной среды дополнительно учтена высокая степень анизотропии массива. Используются численные схемы с неконформными сетками. Значительную часть главы занимают примеры прикладных расчётов фильтрации воды и нефти в массиве при наличии нескольких скважин, хорошо иллюстрирующие практическую ценность результатов.

Глава 3 посвящена решению пространственных задач термоупругости анизотропных неоднородных тел. Разрешающие уравнения получены проекционным методом, что представляет определённый интерес с точки зрения общности описания, например, больших деформаций, хотя геометрическая нелинейность отдельно не анализируется. Задача термоупругости решается как нестационарная, а процесс деформирования сопряжён с теплопереносом. Приведён пример применения модели к расчёту полей температуры и напряжённо-деформированного состояния композитного обтекателя при интенсивном поверхностном нагреве. Полученные результаты сравниваются как с аналитическим решением модельной задачи и данными независимого расчёта комплексом ANSYS, так и с экспериментальными данными. Полученные результаты могут быть использованы при оценке прочности конструкции обтекателя в эксплуатации и при выборе рационального армирования силовой оболочки обтекателя.

В главе 4 рассмотрено решение обратных задач, в которых поведение объекта (массива горных пород) определяется электромагнитными полями и одновременно фильтрацией. Рассмотрены вопросы тополого-геометрического моделирования слоистого массива с криволинейными границами слоёв, описаны факторы и отклики моделей частных процессов и построена структура функционала, минимизация которого даёт приближённое решение обратной задачи. Приведено краткое описание идеи алгоритма минимизации (на основе метода Гаусса-Ньютона) и освещены некоторые вопросы ускорения его сходимости. Построена система локальных ограничений на искомые функции и описаны способы вычисления функций, входящих в ограничения.

Глава 5 посвящена описанию реализованных программных комплексов. Описана архитектура и основные функции двух комплексов: 1) для обработки данных полевых измерений в геологоразведке и эксплуатации нефтяных скважин, 2) для проектирования и исследования напряжённо-деформированного состояния термоупругих анизотропных конструкций. На разработанные программы для ЭВМ получено 9 свидетельств о государственной регистрации.

Глава 6 описывает практическую реализацию разработанных методов математического моделирования и программных комплексов при обработке геофизических данных: аэроэлектроразведки, наземной индукционной электроразведки, электроразведки с измерением вызванной поляризации, измерения дебита жидкости в скважинах. Констатируется применимость полученных результатов для построения цифровых моделей технических объектов и работоспособность программных комплексов при решении практических задач.

В заключении описаны основные результаты работы и сформулированы выводы.

Оценка научной новизны, достоверности результатов и практической значимости результатов.

Наиболее существенным результатом диссертации является разработка единого подхода к решению прямых и обратных задач моделирования взаимосвязанных процессов и явлений: электромагнетизма, фильтрации, теплопередачи и термоупругого деформирования в неоднородных анизотропных технических объектах и массивах горных пород, состоящего в построении высокоэффективных моделей частных процессов, сопрягаемых без потери эффективности.

Следующие результаты работы обладают **научной новизной**.

В области математического моделирования:

1. Математические модели, основанные на использовании двойного выделения поля, которые позволяют существенно повысить вычислительную эффективность решения задач геоэлектромагнетизма в сложных средах с криволинейными поверхностями.

2. Усовершенствованная геометрическая параметризация неоднородных массивов горных пород, которая позволяет повысить точность расчёта электромагнитных полей и потоков фильтрации в сложно построенных массивах с криволинейными границами слоев.

В области численных методов:

3. Алгоритм поиска и устранения дефектов несогласованной конечно-элементной сетки при построении конформного базиса, повышающий вычислительную эффективность методов конечноэлементного моделирования на неконформных сетках.

4. Алгоритм адаптивной регуляризации, который обеспечивает устойчивую сходимость решения обратной задачи и исключает дефекты тополого-геометрического представления внутренних границ неоднородной области.

5. Экономичные вычислительные схемы для расчета чувствительности к геометрическим параметрам модели, отражающей несколько взаимосвязанных процессов различной физической природы.

В области комплексов программ:

6. Разработанные программные комплексы для решения двух классов задач: обработки данных полевых измерений в геологоразведке и эксплуатации нефтяных скважин, а также для исследования теплопереноса и термоупругих деформаций анизотропных конструкций.

7. Реализованные в программных комплексах методы построения конечно-элементных аппроксимаций на несогласованных шестигранных сетках в неоднородных средах с криволинейными границами и анизотропными свойствами материалов с изменяющимися в пространстве направлениями анизотропии.

Эти результаты являются **значимыми** для разработки и совершенствования методов и программных средств математического моделирования физических полей в пространственных технических и природных объектах со сложными физическими свойствами.

Практическая ценность диссертации состоит в возможности применения полученных результатов при разработке цифровых технологий поддержки проектирования конструкций, разведочной геофизики и эксплуатации месторождений полезных ископаемых, и подтверждается 5 актами об использовании результатов работы в промышленности.

Степень обоснованности выводов и рекомендаций.

Обоснованность моделей частных физических процессов подтверждается сравнением полученных решений трехмерных задач термоупругости, геоэлектромагнетизма и многофазной фильтрации с аналитическими решениями модельных задач и экспериментальными данными, в том числе полученными в промышленных условиях.

Вычислительная эффективность построенных численных схем на неконформных шестигранных сетках обоснована путем сравнения с известными схемами и их программными реализациями.

Предложенные подходы и алгоритмы решения обратных задач, включая новые решения по параметризации, регуляризации и вычислению производных по параметрам, обоснованы результатами, полученными на большом объеме синтезированных и реальных данных.

Выводы и рекомендации по результатам моделирования термоупругого состояния для конструкций из композитных материалов под экстремальными механическими и немеханическими нагрузками обоснованы сравнением результатов расчёта с данными эксперимента и согласуются с известными представлениями.

Положения и выводы, связанные с реализацией проблемно-ориентированных программных комплексов, подтверждены представленными в них результатами обработки практических данных электромагнитных зондирований в различных регионах и данных со скважин на месторождении высоковязкой нефти. Возможности решения практических задач подтверждены актами внедрения.

Соответствие научной специальности. Диссертация по области исследования соответствует паспорту специальности 05.13.18 – Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ: п. 1 «Разработка новых математических методов моделирования объектов и явлений», п. 3 «Разработка, обоснование и тестирование эффективных вычислительных методов с применением современных компьютерных технологий», п. 4 «Реализация эффективных численных методов и алгоритмов в виде комплексов проблемно-ориентированных программ для проведения вычислительного эксперимента», п. 7 «Разработка новых математических методов и алгоритмов интерпретации натурного эксперимента на основе его математической модели».

Защищаемые в диссертации положения опубликованы в 12 статьях в ведущих изданиях, включенных в Перечень рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени доктора наук, и в 14 статьях в журналах, индексируемых в базах Web of Science и Scopus, из них 12 – в журналах 1 и 2 квартилей.

Автореферат достаточно полно отражает содержание диссертации.

Работа написана ясно, с использованием общепринятой технической и научной терминологии, соответствует критериям проработанности, обоснованности и целостности научной концепции, научности знания, непротиворечивости и полноты разработанной теории, с соблюдением условий состоятельности выдвигаемых гипотез.

Оформление диссертации и автореферата соответствует предъявляемым требованиям.

По содержанию диссертации и автореферата имеются следующие **замечания**.

1. Одним из оснований для построения эффективных вычислительных схем является преобразование модели в горизонтально-слоистую среду с сохранением топологии, однако при этом не анализируется применимость этого подхода к массивам с разрывными горно-геологическими нарушениями.

2. Не анализируется погрешность, вызванная применением пространственной сетки при моделировании термоупругости тонкостенного элемента конструкции с высокой податливостью на изгиб.

3. Представляется целесообразным в дальнейшем адаптировать методы и алгоритмы геометрической инверсии, разработанные автором применительно к массивам горных пород, для решения обратных задач проектирования и диагностики анизотропных конструкций.

4. Использование проекционного метода при получении разрешающих уравнений термоупругости принципиально позволяет применить разработанную модель для расчёта больших (нелинейных) деформаций тонкостенных конструкций, однако это направление исследований автором не учтено.

5. Имеются некоторые замечания к оформлению диссертации. Так, на стр. 117 рисунок 3.4 содержит англоязычные надписи в поле рисунка. На стр. 118 в подрисуночной подписи употреблено выражение «анизотропных осей» вместо «осей анизотропии».

Отмеченные недостатки не являются принципиальными и не снижают научную и практическую значимость проведённого исследования, направленного на разработку фундаментальных основ и применение математического моделирования, численных методов и комплексов программ для решения научных и технических проблем в области геологоразведки, эксплуатации подземных месторождений и конструкционной прочности.

Заключение

Оценивая работу в целом, отметим полноту проведенного анализа, наличие новых научно-технических решений, обоснованность и практиче-

скую ценность полученных результатов, внутреннее единство и личный вклад соискателя в науку.

Диссертация «Методы и реализующее их программное обеспечение для решения трехмерных прямых и обратных задач геоэлектромагнетизма, термоупругости и многофазной фильтрации» является научно-квалификационной работой, в которой на основании выполненных автором исследований изложены новые научно обоснованные технические решения, внедрение которых вносит значительный вклад в развитие страны.

Тем самым диссертация соответствует критериям п. 9 и 10 Положения о присуждении ученых степеней, утвержденного Постановлением Правительства РФ от 24 сентября 2013 г. № 842 в редакции от 11.09.2021 г., в части, касающейся ученой степени доктора наук. Автор диссертации, Вагин Денис Владимирович, заслуживает присуждения ему учёной степени доктора технических наук по специальности 05.13.18 – Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ.

Дата: 24.06.2022 г.

 В.О. Каледин

доктор технических наук (01.02.06 – Динамика, прочность машин, приборов и аппаратуры),

профессор,

заведующий научно-исследовательской лабораторией математического моделирования Кузбасского гуманитарно-педагогического института федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Кемеровский государственный университет» (КГПИ ФГБОУ ВО «КемГУ»);

юридический адрес: Россия, 650043, г. Кемерово, ул. Красная, 6,

e-mail: rector@kemsu,

официальный сайт организации: www.kemsu.ru,

тел. организации: (3842) 58-12-26;

почтовый адрес: Россия, 654041, г. Новокузнецк, ул. П

e-mail: root@nbikemsu.ru,

официальный сайт организации: https://nbikemsu.ru,

тел. организации (3843) 77-60-54,

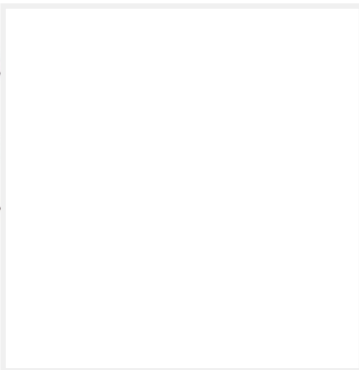
тел.: +7(923)-460-63-43

e-mail: vkaled@mail.ru

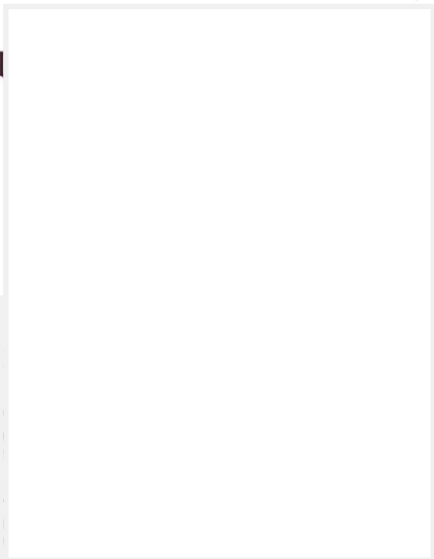
Подтверждаю согласие на обра

Подпись профессора Каледина

Начальник кадровой службы


*Отзыв поступил
в совет 7.07.2022*




*С отзывом ознакомлен 7
8.07.2022
Вагин*