

УТВЕРЖДАЮ

И.О. Директора ФГБУН «Институт
вычислительной математики и матема-
ки Сибирского отделе-
академии наук» (ИВ-
Н), доктор физико-
аук

Пененко А.В.

29.06.2022

ОТЗЫВ ВЕДУЩЕЙ ОРГАНИЗАЦИИ

Федерального государственного бюджетного учреждения науки Институт вычислительной математики и математической геофизики Сибирского отделения Российской академии наук

на диссертационную работу Вагина Д.В. на тему: «Методы и реализующее их программное обеспечение для решения трехмерных прямых и обратных задач геоэлектромагнетизма, термоупругости и многофазной фильтрации», представленной на соискание ученой степени доктора технических наук по специальности 05.13.18 – Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ

1. Актуальность темы исследования

Диссертационная работа Вагина Д.В. посвящена разработке вычислительных схем решения прямых и обратных трехмерных задач, в том числе включающих подобласти с анизотропными физическими свойствами материалов. В диссертации рассматриваются три класса задач. Это прямые и обратные задачи геоэлектромагнетизма, прямые задачи термоупругости и обратные задачи многофазной фильтрации.

Наибольшее внимание уделено задачам геоэлектромагнетизма, связанным с различными технологиями электроразведки, прежде всего, обратным задачам, целью которых является восстановление структуры и свойств среды. Фактически строится цифровая модель изучаемой среды. Качество такой модели во многом зависит от применяемых математических методов решения обратных задач – инверсий полевых данных. Это, в свою очередь, требует разработки методов адекватного и эффективного численного моделирования, что означает, в том числе, необходимость учета сложной геометрии геологических структур, характера их свойств и, в целом, высокой вычислительной эффективности применяемых методов решения прямых трехмерных задач.

Другие рассматриваемые в диссертации направления исследований связаны с решением задач термоупругости и многофазной фильтрации. Задачи термоупру-

гости с анизотропными свойствами материалов представляют большой интерес в связи с активным развитием технологий, использующих композитные материалы. Задачи многофазной фильтрации с анизотропными свойствами среды также высоко востребованы и имеют множество приложений. Здесь все более актуальными становятся рассматриваемые в диссертационной работе задачи построения цифровых моделей нефтяных месторождений, на основе которых можно строить прогнозы нефтедобычи высокого качества и на основании их рационально управлять разработкой месторождений.

Таким образом, рассмотренные в диссертационной работе направления исследований являются актуальными, что подтверждается также и большим числом соответствующих публикаций в отечественной и зарубежной научной литературе.

2. Структура и содержание работы

Работа состоит из введения, шести глав, заключения, списка литературы (274 наименования), приложений А и Б. Общий объем работы – 300 страниц.

Во **введении** приведен достаточно полный обзор степени разработанности темы диссертационного исследования и обоснована ее актуальность. Указаны цели и задачи работы, описаны ее основные научные результаты и их практическая и теоретическая значимость.

В **первой** главе приводятся методы конечно-элементного моделирования стационарных, нестационарных и гармонических трехмерных геоэлектромагнитных полей в областях со сложной геометрией геологических слоев. Приводятся вариационные постановки и конечно-элементные аппроксимации на неструктурированных несогласованных сетках. Приводятся результаты верификации и оценка вычислительной эффективности разработанных методов для различных технологий электроразведки. Отдельно рассматривается метод моделирования во временной области геоэлектромагнитных полей с учетом индукционной вызванной поляризации.

Во **второй** главе рассматривается метод конечно-элементного моделирования многофазной фильтрации в средах с анизотропными свойствами. Приводятся вариационная постановка и конечно-элементные аппроксимации на неструктурированных несогласованных сетках, а также примеры решения задач с анизотропной проницаемостью и искривленной геометрией пласта.

В **третьей** главе рассматриваются математические модели, вариационные постановки и конечно-элементные аппроксимации для решения трехмерных задач термоупругости с анизотропными свойствами материалов и результаты верификации разработанных вычислительных схем. Приводится пример расчета напряженно-деформированного состояния обтекателя гиперзвукового летательного аппарата с композитными стенками, подвергающегося высоким температурным и механическим нагрузкам.

В **четвертой** главе приводятся вычислительные схемы решения трехмерных обратных задач геоэлектромагнетизма и многофазной фильтрации с использованием специальной параметризации объектов и вмещающей среды. Рассматриваются методы расчета производных по искомым физическим и геометрическим параметрам, а также адаптивная регуляризация для нелинейных обратных задач, реализующая выполнение необходимых ограничений на допустимые изменения значений параметров. Для геометрических параметров предложено использовать схему с дискретными значениями, позволяющую снять проблему возможного резкого ухудшения обусловленности конечно-элементных систем при решении обратных задач геоэлектромагнетизма.

В **пятой** главе приводится описание программных комплексов, реализующих разработанные методы решения задач геоэлектромагнетизма, термоупругости и многофазной фильтрации. Подробно описываются общая структура данных программных комплексов и их особенности, связанные с реализацией вычислительных схем решения соответствующих прямых и обратных задач.

В **шестой** главе приводятся результаты решения различных задач обработки данных аэро-, наземной и морской электроразведки, а также результаты построения цифровой модели нефтяного месторождения по данным со скважин. Описываются методики применения геометрической 3D-инверсии данных электромагнитной съемки при решении различных типов геологических задач, в том числе в ситуации, когда отклики целевых объектов перекрыты достаточно мощными откликами существенно неоднородной вмещающей среды. Демонстрируется устойчивость получаемых решений обратных задач к ориентации используемых при выполнении 3D-инверсии блочных структур и зашумлению измеряемых сигналов.

В **заключении** приводятся основные выводы и результаты диссертационной работы.

Представленные результаты диссертационного исследования достаточно полно отражены в публикациях автора. Основные результаты диссертации были представлены на множестве международных и российских конференциях. Таким образом, апробация представленных в диссертации результатов проведена в достаточной мере. По теме диссертации опубликовано 55 работ, в том числе 12 научных публикаций в журналах, входящих в перечень изданий, рекомендуемых ВАК для защиты докторских диссертаций, 34 научные публикации, индексируемые в международной информационно-аналитической системе научного цитирования Scopus, 26 из которых проиндексированы в международной информационно-аналитической системе научного цитирования Web of Science. Среди публикаций, проиндексированных в Scopus и Web of Science, 6 входят в квартиль Q_1 и 6 входят в квартиль Q_2 . Получено 28 свидетельств о государственной регистрации программ для ЭВМ.

3. Обоснованность и достоверность результатов, выводов и заключений

Обоснованность и достоверность результатов подтверждаются большим количеством выполненных вычислительных экспериментов и результатами верификации разработанных процедур.

Верификация решения прямых трехмерных задач геоэлектромагнетизма проводилась несколькими способами, а именно: сравнением с решениями задач в средах меньшей размерности; сравнением решений в трехмерных средах, полученными с использованием разных подходов, таких как расчеты с заданием источника непосредственно в трехмерной среде и расчеты, использующие разделение поля на первичное (поле источника в горизонтально-слоистой среде) и вторичное (добавочное поле, порождаемое трехмерными неоднородностями); сравнением с результатами, полученными другими авторами.

Верификация решения прямых задач многофазной фильтрации с учетом анизотропных свойств среды проводилась с помощью тестов SPE (международной организации специалистов нефтяной промышленности). Результаты проведенных расчетов для анизотропных задач, в том числе со сложной геометрией пласта, соответствуют заданным свойствам среды.

Верификация решения прямых трехмерных задач термоупругости с анизотропными свойствами материалов проводилась с помощью тестов, имеющих аналитическое решение, и сравнением с данными экспериментов для обтекателей гиперзвуковых летательных аппаратов. Отличие результатов расчета и измеренных данных лежат в пределах неточности использовавшейся измерительной аппаратуры.

Верификация решения обратных трехмерных задач геоэлектромагнетизма и многофазной фильтрации проводилась с помощью синтетических и практических данных. Для задач геоэлектромагнетизма были рассмотрены различные технологии электроразведки, а результаты инверсии по практическим данным сравнивались с данными бурения. Выводы, сделанные автором касательно эффективности и устойчивости разработанных методов геометрической 3D-инверсии, подтверждены приведенными примерами решения различных задач, в том числе с зашумленными данными.

4. Научная новизна

1. Предложен новый подход к решению трехмерных задач геоэлектромагнетизма с существенно негоризонтальными поверхностями геологических слоев, основанный на коррекции ошибки решения трехмерной задачи с помощью задачи, геометрически и топологически близкой к исходной.

2. Предложена оригинальная вычислительная схема расчета трехмерного электромагнитного поля с учетом индукционной вызванной поляризации.

3. Предложен метод учета анизотропии физических свойств в конечно-элементных вычислительных схемах решения задач геоэлектромагнетизма, термоупругости и многофазной фильтрации на нерегулярных трехмерных сетках с ячейками в виде шестигранников, который основан на переходе из локальной

системы координат в глобальную и позволяет моделировать среды и конструкции сложной формы с криволинейными внешними и внутренними поверхностями.

4. Для реализации методов моделирования различных трехмерных полей на трехмерных сетках с шестигранными ячейками предложен метод поиска и устранения неявных «перехлестов» граней ячеек.

5. Разработаны и реализованы в программном комплексе вычислительные схемы решения обратных задач геоэлектромагнетизма и многофазной фильтрации, основанные на совместном использовании различных геометрических и физических параметров, методе Гаусса-Ньютона и применении адаптивной регуляризации.

6. Разработаны вычислительные схемы расчета производных полей различной природы по искомым параметрам трехмерной обратной задачи, учитывающие различные типы параметризации обратной задачи и конфигурацию используемой вычислительной среды.

5. Практическая значимость работы

Разработанные вычислительные схемы решения прямых и обратных задач геоэлектромагнетизма и многофазной фильтрации реализованы в программном комплексе, который применялся для обработки практических данных электромагнитных зондирований, полученных на площадях Восточной и Западной Сибири, Казахстане и Северном море, а также для обработки данных, полученных на одном из нефтяных месторождений в республике Татарстан. Разработанные на основе геометрической параметризации вычислительные схемы решения трехмерных обратных задач дают возможность выделять слабоконтрастные целевые геологические объекты в сложных средах, в том числе и при высокой зашумленности измеренных сигналов, а также строить цифровые модели нефтяных месторождений, позволяющие делать на их основе высокоточные прогнозы.

Разработанные вычислительные схемы решения трехмерных задач термоупругости с анизотропными свойствами материалов были использованы для моделирования напряженно-деформированного состояния конструкции обтекателя гиперзвукового летательного аппарата с композитными стенками, подвергающейся экстремальным тепловым воздействиям. Были получены результаты, которые могут быть использованы для проектирования новых термозащитных конструкций.

6. Теоретическая значимость работы

Разработанные методы построения конечно-элементных аппроксимаций на неконформных сетках с произвольными шестигранными ячейками в средах со сложной геометрией и анизотропными физическими свойствами могут служить основой для создания новых вычислительных схем трехмерного моделирования различных физических процессов в сложных областях.

Разработанные методы решения трехмерных обратных задач геоэлектромагнетизма и многофазной фильтрации, основанные на геометрической параметризации и адаптивной регуляризации, могут служить теоретической базой для развития технологий электроразведки и нефтедобычи, а также для дальнейшей разработки вычислительно эффективных методов решения обратных задач.

В результате проведенных численных экспериментов для задачи термоупругости на модельных конструкциях были получены полезные для изучения свойств композитных материалов результаты.

7. Рекомендации по использованию результатов работы

Разработанные и реализованные в виде программного комплекса методы решения прямых и обратных задач геоэлектромагнетизма могут быть использованы при поиске месторождений углеводородов и рудных полезных ископаемых. Программный комплекс, реализующий методы решения обратных задач многофазной фильтрации может применяться для повышения точности прогнозирования нефтедобычи при промышленной разработке нефтяных месторождений. Программный комплекс, реализующий методы решения прямых задач термоупругости может применяться при проектировании конструкций с анизотропными свойствами, подвергающихся интенсивным механическим и температурным нагрузкам.

Созданные автором программные комплексы могут быть внедрены в различных научно-производственных организациях, занимающихся геологоразведкой с применением электромагнитных технологий, в нефтедобывающих компаниях, а также в организациях и на предприятиях, занимающихся проектированием конструкций из новых материалов.

8. Замечания по диссертации

1. Производительность программного кода во многом зависит от используемых методов вычислительной алгебры. Этот момент слабо освещен в диссертационной работе.

2. Для минимизации функционала при решении обратных задач в работе используется метод Гаусса-Ньютона. Однако, на сегодняшний день достаточно активно развиваются другие методы оптимизации, Рассматривалась ли возможность применения этих методов для решения рассматриваемых в диссертации классов задач?

9. Заключение

Диссертационная работа Вагина Д.В. «Методы и реализующее их программное обеспечение для решения трехмерных прямых и обратных задач геоэлектромагнетизма, термоупругости и многофазной фильтрации» представляет собой завершенную научно-исследовательскую работу на актуальную тему. Новые научные результаты, полученные диссертантом, имеют существенное значение для науки и практики. Выводы и рекомендации достаточно обоснованы.

Автореферат и опубликованные автором работы отражают основное содержание диссертации. Работа отвечает требованиям «Положения о присуждении ученых степеней», предъявляемым к докторским диссертациям, и соответствует специальности 05.13.18 – Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ, так как содержит оригинальные результаты одновременно из трех областей:

1. Математическое моделирование:

- предложен и разработан метод двойного выделения поля, основанный на коррекции ошибки решения трехмерной задачи с помощью задачи, геометрически и топологически близкой к исходной;
- предложена новая вычислительная схема расчета трехмерного электромагнитного поля с учетом эффектов индукционной вызванной поляризации;
- предложена оригинальная схема построения конечно-элементных аппроксимаций трехмерных задач и учета анизотропии физических свойств в сложных трехмерных конструкциях и средах;
- предложены новые, основанные на геометрической параметризации, методы трехмерной инверсии, позволяющие в задачах геоэлектromagnetизма выделять целевые объекты в условиях высокого влияния неоднородностей среды и различных помех, а в задачах многофазной фильтрации – получать адекватные цифровые модели нефтяных месторождений;

2. Численные методы:

- предложен и реализован метод поиска и устранения «невных перехлестов», позволяющий эффективно использовать сложные неконформные конечно-элементные сетки из шестигранных и параллелепипедальных ячеек при решении задач геоэлектromagnetизма и многофазной фильтрации в сложных средах;
- предложены и разработаны вычислительные схемы для устойчивого расчета производных сигналов в приемниках поля по искомым физическим и геометрическим параметрам;

3. Комплексы программ:

- разработаны программные комплексы решения задач геоэлектromagnetизма, многофазной фильтрации и термоупругости, которые за счет предложенных методов управления данными и распараллеливания вычислений эффективно реализуют предложенные вычислительные схемы решения прямых и обратных задач.

Диссертационная работа соответствует следующим пунктам паспорта специальности:

1. Разработка новых математических методов моделирования объектов и явлений;

3. Разработка, обоснование и тестирование эффективных вычислительных методов с применением современных компьютерных технологий;

4. Реализация эффективных численных методов и алгоритмов в виде комплексов проблемно-ориентированных программ для проведения вычислительного эксперимента;

Автор работы Вагин Денис Владимирович заслуживает присуждения ученой степени доктора технических наук по специальности 05.13.18 – Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ.

Диссертационная работа и отзыв на нее обсуждены и одобрены на объединенном семинаре ИВМиМГ СО РАН и кафедры вычислительной математики ММФ НГУ, протокол № 44 от 28.06.2022 г.

Отзыв подготовил

г.н.с. лаборатории вычислительной физики ИВМиМГ СО РАН,

д.ф.-м.н. по специальности

05.13.18 – Математическое моделирование,

численные методы и комплексы программ

В.М. Свешников.

Подпись В.М. Свешникова за

Ученый секретарь ИВМиМГ

Л.В. Вшивкова.

*Отзыв поступил
в совет 7.07.2022*



С отзывом ознакомлен

8.07.2022

Вагин