



Минобрнауки России
Федеральное государственное учреждение
«Федеральный исследовательский центр
Институт прикладной математики им. М.В. Келдыша
Российской академии наук»
(ИПМ им. М.В. Келдыша РАН)

125047, Москва, Миусская пл., 4 Тел. 8 (499) 220-72-33 Факс 8 (499) 972-07-37
http://keldysh.ru e-mail: office@keldysh.ru
ОКПО 02699381 ОГРН 1037739115787 ИНН/КПП 7710063939/771001001

10.06.2019 № 11103-9422/469

На № _____

УТВЕРЖДАЮ

Директор
Федерального государственного учреждения
«Федеральный исследовательский центр
Институт прикладной математики
им. М.В. Келдыша Российской академии наук»,

член-корреспондент РАН,
доктор физико-математических наук, профессор

А.И. Аптекарев



2019 г.

ОТЗЫВ

ВЕДУЩЕЙ ОРГАНИЗАЦИИ

Федерального государственного учреждения
«Федеральный исследовательский центр Институт прикладной математики
им. М.В. Келдыша Российской академии наук»
о диссертации МАРКОВА Сергея Игоревича

**«Применение конформных и неконформных методов конечных элементов
для многомасштабного моделирования процесса фильтрации в
геологических средах»,**

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

Современная нефтегазодобывающая промышленность сталкивается со многими наукоёмкими прикладными задачами. Заметное место среди них занимает проблема исследования транспортно-фильтрационных свойств геологических сред. Для её решения применяются гидродинамические методы исследования кернов (работы А. Чодри, Л.П. Дейк, В.Л. Карнаухова, П.В. Мангазеев). Отличительная особенность таких методов – их разрушающий характер, поскольку прямой контакт породы с флюидом может приводить к необратимым изменениям физических свойств уникальных и дорогостоящих образцов. Математическое моделирование процессов фильтрации предоставляет возможности для проведения виртуальных гидродинамических исследований.

Факт наличия анизотропии свойств геологических сред, а в частности, анизотропии проницаемости, был экспериментально установлен достаточно давно и были получены экспериментальные результаты, позволяющие увидеть изменение проницаемости в зависимости от направления. Описание теоретических основ течения в анизотропных средах было представлено в работах А.Т. Горбунова, Г.В. Щербакова, Е.Г. Шешукова, Ю.М. Молоковича, Р. Дахлера, Ф. Шаффернака, В.С. Козлова, Г.К. Михайлова, П.Я. Полубариновой-Кочиной, В.М. Максимова, М.Н. Дмитриева, Н.М. Дмитриева и других. Результаты исследований в этой области также были получены и приведены в монографиях В.Н. Николаевского, Е.С. Ромма, Р.Коллинза, Г.И. Баренблатта, А.Э. Шейдеггера и других. Однако, лишь в последнее время определение анизотропных свойств сред стало формироваться в теоретически обоснованную методику, позволяющую устанавливать не просто наличие факта анизотропии, но и определять тензоры абсолютной проницаемости, см. работы М.Н. Дмитриева, Н.М. Дмитриева, А.А. Семенова, А.А. Мурадова.

Все вышесказанное позволяет сделать вывод, что развитие теоретической базы и методики лабораторного определения тензорных характеристик анизотропных горных пород является одним из основных направлений в нефтегазовой промышленности. Но расчеты течений в геологических средах сталкиваются с серьезными трудностями в связи с естественной многомасштабностью и анизотропией физических свойств сред, поэтому численное моделирование процессов фильтрации является **актуальной проблемой**, требующей разработки адекватных средств современной прикладной математики.

Решению указанной проблемы посвящена кандидатская диссертация С.И. Маркова. Диссертация основана на солидной математической базе. В работе в рамках единой математической идеологии разработаны вычислительные схемы конформных и неконформных методов конечных элементов для моделирования процесса фильтрации несжимаемой жидкости в многомасштабной гетерогенной среде с учётом анизотропии тензора абсолютной проницаемости.

Для решения задач исследования использованы подходы, расширяющие идеи, описанные в работах других авторов (M.F. Wheeler, B. Riviere, Y. Efendiev и др.). Вы-

числительные схемы разрывного метода Галёркина для решения задачи просачивания в трёхмерной постановке с учётом анизотропной природы абсолютной проницаемости среды и алгоритм вычисления эффективного тензора абсолютной проницаемости на базе метода давления и решения обратной коэффициентной задачи предложены и реализованы впервые.

В диссертационной работе получены следующие новые результаты, принадлежащие лично Автору:

1. Уточнены вариационные формулировки стабилизированного метода конечных элементов и разрывного метода Галёркина для моделирования процесса фильтрации несжимаемой жидкости в многомасштабной гетерогенной среде. Предложена и реализована вычислительная схема на базе разрывного метода Галёркина и проекционной процедуры Чорина–Темама для расчета течения флюида в многомасштабной геологической среде
2. Построен алгоритм вычисления тензора абсолютной проницаемости. установлен допустимый порог зашумления измеряемых данных для корректного решения обратной задачи
3. Получены содержательные результаты математического моделирования процесса фильтрации несжимаемой жидкости в гетерогенной среде: установлено существование порога объёмной пористости гетерогенной среды, при котором возможен переход от анизотропной модели абсолютной проницаемости к изотропной.

Достоверность и обоснованность результатов подтверждена вычислительными экспериментами для оценки точности разработанных вычислительных схем при решении задач фильтрации, имеющих аналитическое решение и приближенных к реальным, а также при сравнении с данными физических экспериментов.

Показана пригодность разработанных вычислительных схем для моделирования процесса фильтрации несжимаемой жидкости в многомасштабных гетерогенных средах с учётом анизотропной природы абсолютной проницаемости. Научные выводы могут быть применены при разработке месторождений полезных ископаемых, мониторинге и охране окружающей среды, создании композитных материалов.

Основные результаты диссертации опубликованы в рецензируемых научных изданиях и представлены на научных всероссийских и международных конференциях, на научных семинарах, имеются две зарегистрированные программы для ЭВМ. Выводы, представленные в диссертации и автореферате, обоснованы и не противоречат общепринятым научным представлениям.

Результаты исследования внедрены в проекты ОФИ-М № 13-05-12031 «Многомасштабное, многофизичное моделирование естественных и искусственных электромагнитных полей в задачах наземной и морской геоэлектрики», № 16-29-15094 «Разработка программного комплекса для реализации на современных высокопроизводительных кластерах алгоритмов численного моделирования физических процессов в

нефтегазоносных пластах, а именно: гидродинамики в пористых трещиноватых средах; идентификация трещин в гетерогенном флюидонасыщенном межскважинном пространстве электромагнитными методами».

По содержанию кандидатской диссертации можно сделать следующие замечания:

1. Для верификации алгоритма вычисления эффективного тензора абсолютной проницаемости можно было расширить систему тестов для выяснения влияния формы неоднородностей на величину эффективного тензора абсолютной проницаемости среды.
2. Было бы интересно исследовать влияние выбора численных потоков на границах конечных элементов в разрывном методе Галёркина на точность решения задачи фильтрации.
3. Формулы (2.97) и (2.133) не являются записью неявных схем.

Замечания носят рекомендательный характер, не снижают значимость проделанных исследований и не ставят под сомнение полученные научные выводы. Кандидатская диссертация Маркова С.И. является законченным научным исследованием, текст диссертации написан грамотным научным языком, автореферат полностью отражает основное содержание диссертации.

Результаты диссертации могут быть использованы в институтах Российской академии наук (Институте прикладной математики, Вычислительном центре, Институте проблем механики, Институте вычислительной математики и математической геофизики СО РАН, Институте гидродинамики им. М.А. Лаврентьева СО РАН и др. организациях РАН).

Принимая во внимание актуальность темы научного исследования, новизну и практическую значимость полученных результатов для развития нефтегазодобывающей отрасли, можно заключить, что представленная к защите кандидатская диссертация соответствует всем требованиям ВАК, предъявляемым к диссертациям на соискание учёной степени кандидата физико-математических наук и удовлетворяет требованиям Положения о порядке присуждения учёных степеней. Содержание диссертационной работы соответствует паспорту специальности 05.13.18 – Математическое моделирование численные методы и комплексы программ. Марков Сергей Игоревич заслуживает присуждения учёной степени кандидата физико-математических наук по специальности 05.13.18.

Диссертационная работа Маркова С.И. «Применение конформных и неконформных методов конечных элементов для многомасштабного моделирования процесса фильтрации в геологических средах» и настоящий отзыв на диссертацию заслушаны и обсуждены на научном семинаре "Вычислительные методы и математическое моделирование" им. Ю.П. Попова при отделе № 11 Федерального государственного учреждения «Федеральный исследовательский центр Институт прикладной математики им. М.В. Келдыша Российской академии наук» 10 июня 2019 г., протокол № 225.

В работе семинара приняли участие 35 членов научного семинара, из которых 7 докторов наук, 23 кандидата наук.

Результаты голосования:

«за» – 35 человек, «против» – нет, «воздержавшихся» – нет.

Отзыв подготовил главный научный сотрудник Федерального государственного учреждения «Федеральный исследовательский центр Институт прикладной математики им. М.В. Келдыша Российской академии наук», доктор физико-математических наук Жуков Виктор Тимофеевич.

Руководитель научного семинара

Гл.н.с., и.о. заведующего отделом № 11

«Вычислительные методы и математическое моделирование»

Федерального государственного учреждения

«Федеральный исследовательский центр

Институт прикладной математики

им. М.В. Келдыша Российской академии наук»

доктор физико-математических наук,

профессор

 М.П. Галанин

Секретарь научного семинара

Старший научный сотрудник

Федерального государственного учреждения

«Федеральный исследовательский центр

Институт прикладной математики

им. М.В. Келдыша Российской академии наук»

кандидат физико-математических наук

 О.В. Щерица

Адрес:

125047, Москва, Миусская пл., д.4,

ИПМ им. М.В.Келдыша РАН

тел.: +7 499 978-13-14

факс: +7 499 972-07-37

e-mail: office@keldysh.ru