

ЗАКЛЮЧЕНИЕ ДИССЕРТАЦИОННОГО СОВЕТА Д 999.141.03  
НА БАЗЕ ФЕДЕРАЛЬНОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО БЮДЖЕТНОГО  
УЧРЕЖДЕНИЯ НАУКИ ИНСТИТУТА ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ  
СИБИРСКОГО ОТДЕЛЕНИЯ РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК  
МИНИСТЕРСТВА НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ  
ФЕДЕРАЦИИ, ФЕДЕРАЛЬНОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО БЮДЖЕТНОГО  
УЧРЕЖДЕНИЯ НАУКИ ИНСТИТУТА ДИНАМИКИ СИСТЕМ И ТЕОРИИ  
УПРАВЛЕНИЯ ИМЕНИ В.М. МАТРОСОВА СИБИРСКОГО ОТДЕЛЕНИЯ  
РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК МИНИСТЕРСТВА НАУКИ И ВЫСШЕГО  
ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ, ФЕДЕРАЛЬНОГО  
ГОСУДАРСТВЕННОГО БЮДЖЕТНОГО ОБРАЗОВАТЕЛЬНОГО УЧРЕЖДЕНИЯ  
ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ «СИБИРСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ  
УНИВЕРСИТЕТ ТЕЛЕКОММУНИКАЦИЙ И ИНФОРМАТИКИ»  
ФЕДЕРАЛЬНОГО АГЕНТСТВА СВЯЗИ ПО ДИССЕРТАЦИИ НА СОИСКАНИЕ  
УЧЕНОЙ СТЕПЕНИ КАНДИДАТА НАУК.

аттестационное дело № \_\_\_\_\_

решение диссертационного совета от 27 июня 2019 г. № 47

О присуждении Маркову Сергею Игоревичу, гражданину Российской Федерации, ученой степени кандидата физико-математических наук.

**Диссертация** «Применение конформных и неконформных методов конечных элементов для многомасштабного моделирования процесса фильтрации в геологических средах» по специальности 05.13.18 – «Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ» принята к защите 12 апреля 2019 г., протокол № 45, диссертационным советом Д 999.141.03, созданным на базе Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института вычислительных технологий Сибирского отделения Российской академии наук Министерства науки и высшего образования Российской Федерации, 630090, ИВТ СО РАН, пр. Ак. Лаврентьева, 6, г. Новосибирск, Россия; Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института динамики систем и теории управления имени В.М. Матросова Сибирского отделения Российской академии наук Министерства науки и высшего образования Российской Федерации, 664033, ИДСТУ СО РАН, ул. Лермонтова, 134, г. Иркутск, Россия; федерального государственного образовательного бюджетного учреждения высшего образования «Сибирский государственный университет телекоммуникаций

и информатики» Федерального агентства связи, 630102, СибГУТИ, ул. Кирова, 86, г. Новосибирск, Россия. Приказ Минобрнауки России от 09 ноября 2012 г. № 717/нк.

**Соискатель** Марков Сергей Игоревич 1991 года рождения, в 2014 году окончил федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Новосибирский государственный технический университет», в 2018 году окончил аспирантуру федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Новосибирский государственный технический университет», работает научным сотрудником в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институте нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука Сибирского отделения Российской академии наук» Министерства науки и высшего образования Российской Федерации. Диссертация выполнена на кафедре вычислительных технологий федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Новосибирский государственный технический университет» Министерства науки и высшего образования Российской Федерации, а также в лаборатории электромагнитных полей и лаборатории математического моделирования многофизических процессов в нативных и искусственных многомасштабных гетерогенных средах Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука Сибирского отделения Российской академии наук Министерства науки и высшего образования Российской Федерации.

**Научный руководитель** – доктор технических наук, профессор Шурина Элла Петровна, профессор кафедры вычислительных технологий федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Новосибирский государственный технический университет».

#### **Официальные оппоненты**

Лаевский Юрий Миронович, доктор физико-математических наук, профессор, главный научный сотрудник лаборатории математических задач химии Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института вычислительной математики и математической геофизики Сибирского отделения Российской академии наук, г. Новосибирск,

Лалин Василий Николаевич, кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник лаборатории математического моделирования Федерального

государственного бюджетного учреждения науки Института вычислительных технологий Сибирского отделения Российской академии наук, г. Новосибирск, дали положительные отзывы на диссертацию.

**Ведущая организация** Федеральное государственное учреждение «Федеральный исследовательский центр Институт прикладной математики им. М.В. Келдыша Российской академии наук», г. Москва, в своем положительном заключении, подписанном Галаниным Михаилом Павловичем, доктором физико-математических наук, и.о. заведующего отделом № 11 Федерального государственного учреждения «Федеральный исследовательский центр Институт прикладной математики им. М.В. Келдыша Российской академии наук», указала, что диссертация Маркова С.И. полностью соответствует паспорту специальности 05.13.18 – «Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ», а сам соискатель заслуживает присуждения степени кандидата физико-математических наук.

**Соискатель имеет 35 опубликованных научных работ** (в скобках в числителе указан общий объем этого типа публикаций в печатных листах, в знаменателе – объем, принадлежащий лично автору), в том числе 3 статьи (1.8 п.л./1.1 п.л.) в рецензируемых научных изданиях, рекомендованных ВАК для представления основных научных результатов диссертаций на соискание ученой степени доктора или кандидата наук, 6 статей (2.5 п.л./2.1 п.л.) в рецензируемых журналах (Scopus и Web of Science), 26 работ, опубликованных в материалах и тезисах всероссийских и международных конференций (3.9 п.л./2.9 п.л.), а также 2 свидетельства о государственной регистрации программы для ЭВМ в Федеральной службе по интеллектуальной собственности, патентам и товарным знакам.

#### **Наиболее значимые научные работы по теме диссертации:**

Иткина Н.Б., **Марков С.И.** Применение разрывного метода Галёркина для решения сингулярно-возмущённых задач / Н.Б. Иткина, С.И. Марков // Вычислительные технологии. – 2016. – Т. 21. – Ч. 4. – с. 49-63.

Иткина Н.Б., **Марков С.И.** Применение стабилизированного векторного метода конечных элементов для моделирования течений газов / Н.Б. Иткина, С.И. Марков // Доклады Академии наук высшей школы. – Изд-во: НГТУ, 2016. – вып.2(31). – с.57-67. – DOI: 10.17212/1727-2769-2016-2-57-67. – Работа выполнена при финансовой поддержке стипендии Президента РФ СП-3627.2016.5.

**Марков С.И.,** Иткина Н.Б. Многомасштабное моделирование процесса просачивания однофазного флюида в пористых средах / С.И. Марков, Н.Б. Иткина //

Сибирские электронные математические известия (Siberian Electronic Mathematical Reports), т.15. – 2018. – с. 115–134. DOI 10.17377/semi.2018.15.013.

Епов М.И., Шурина Е.Р., Иткина Н.В., Кутисчева А.У., **Markov S.I.** Finite element modeling of a multi-physics poro-elastic problem in multiscale media // Journal of Computational and Applied Mathematics, v. 352. – 2019. – P. 1–22.

Иткина Н.В., **Markov S.I.** Determining an effective permeability tensor in anisotropic media / N.B. Itkina, S.I. Markov // 2016 13th International Scientific Technical Conference on Actual Problems of Electronic instrument Engineering (APEIE) Proceedings: сб. тр. науч.-техн. конф. – Novosibirsk: NSTU, October 3-6, 2016. – Vol.1 (P.2). – P.538-543. – ISBN 978-1-5090-4068-1.

**Markov S.I.** Multiscale Nonconformal Finite Element Methods for Solving Problems with Moving Boundaries / S.I. Markov // 2018 14th International Scientific Technical Conference on Actual Problems of Electronic instrument Engineering (APEIE) Proceedings: сб. тр. науч.-техн. конф. – Novosibirsk: NSTU, October 3-6, 2018. – Vol.1 (P.4). – P.174-176. – ISBN 978-1-5386-7053-8.

**Markov S.I.**, Itkina N.B. Projection Methods for Mathematical Modeling of Eddy Flows / S.I. Markov, N.B. Itkina // 2018 14th International Scientific Technical Conference on Actual Problems of Electronic instrument Engineering (APEIE) Proceedings: сб. тр. науч.-техн. конф. – Novosibirsk: NSTU, October 3-6, 2018. – Vol.1 (P.4). – P.177-180. – ISBN 978-1-5386-7053-8.

Помимо отзывов от оппонентов и ведущей организации на диссертацию и автореферат поступило 7 отзывов (все отзывы положительные).

Это отзывы от: 1) **Воскобойникова Ю.Е.** (д.ф.-м.н., профессор, заслуженный работник Высшей школы РФ, заведующий кафедрой прикладной математики федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Новосибирский государственный архитектурно-строительный университет (Сибстрин)», г. Новосибирск); 2) **Полубоярова В.А.** (д.х.н., ведущий научный сотрудник Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института химии твердого тела и механохимии Сибирского отделения Российской академии наук, г. Новосибирск); 3) **Рамазанова М.М.** (д.ф.-м.н., заведующий лабораторией геотермомеханики Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института проблем геотермии Дагестанского научного центра Российской академии наук, г. Махачкала); 4) **Рапуты В.Ф.** (д.ф.-м.н., главный научный сотрудник Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института вычислительной математики и математической геофизики Сибирского

отделения Российской академии наук, г. Новосибирск); 5) **Табаровского Л.А.** (д.т.н., главный научный сотрудник компании Baker Hughes, Houston, USA); 6) **Каледина В.О.** (д.т.н., заведующий научно-исследовательской лабораторией математического моделирования Новокузнецкого института (филиала) Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Кемеровский государственный университет», г. Кемерово); 7) **Дерюгина Ю.Н.** (д.ф.-м.н., главный научный сотрудник Федерального государственного унитарного предприятия «Российский Федеральный Ядерный Центр – Всероссийский Научно-Исследовательский Институт Экспериментальной Физики», г. Саров).

**В отзывах высказаны следующие критические замечания (приведены наиболее существенные):**

- 1) Необходимо пояснить выбор моделей для описания течения несжимаемой жидкости на микроуровне и модели слабо сжимаемой жидкости на мезоуровне и макроуровне. Насколько расходятся результаты при учёте сжимаемости на микроуровне?
- 2) Верификация методов проведена путем сравнения с аналитическими решениями и результатами, полученными самим автором. Сравнения с результатами других исследователей не проводилось, что делает заключение о превосходстве выбранных автором вычислительных методов неочевидным. Выполнено сравнение результатов, полученных с использованием элементов разного порядка, но вычислительные эксперименты на серии сгущающихся сеток не проводились. Такие эксперименты могли бы подтвердить порядок аппроксимации метода, что с учетом довольно высоких погрешностей, полученных при решении большинства задач ( $>2\%$ ), было бы полезно.
- 3) При исследовании чувствительности эффективного тензора проницаемости к зашумленности данных для каждого уровня зашумленности использовалось свое значение параметра регуляризации. Не изменятся ли выводы о чувствительности эффективного тензора при варьировании этого параметра?
- 4) В тексте автореферата сказано, что для выбора параметра регуляризации используется метод квазиоптимального значения. Но в тексте автореферата не приведен функционал, из минимума которого находится квазиоптимальное значение параметра регуляризации, и поэтому неясно, в какой степени этот метод выбора параметра является подходящим для рассматриваемой обратной задачи.

- 5) Было бы интересно увидеть сравнительный анализ разработанных вычислительных схем на базе метода конечных элементов с другими вычислительными схемами на базе методов конечных разностей, конечных объёмов и т.д.
- 6) Из автореферата неясно, как выбираются параметры стабилизации разработанных вычислительных схем разрывного метода Галёркина и стабилизированного метода конечных элементов при решении системы уравнений Навье-Стокса и задачи фильтрации однофазной жидкости.
- 7) Замечание по алгоритму регуляризации в обратной задаче. Добиться устойчивого и правильного решения путём минимизации функционала невязки по Тихонову может оказаться невозможным при использовании полевых данных. Вполне вероятно, потребуется привлечение дополнительной априорной информации, например данных об испытаниях пластов.

**Выбор официальных оппонентов и ведущей организации обосновывается** близостью тематики исследования оппонентов и ведущей организации к теме диссертации Маркова С.И., а также тем, что результаты, полученные за последние годы оппонентами и в ведущей организации, публикуются в ведущих мировых журналах по тематике диссертационного исследования.

**Диссертационный совет отмечает, что на основании выполненных соискателем исследований:**

**предложены** усовершенствованные вычислительные схемы стабилизированного конформного метода конечных элементов и неконформного разрывного метода Галёркина для моделирования процесса фильтрации жидкости в многомасштабной гетерогенной среде в трёхмерной постановке;

**предложен** алгоритм вычисления эффективного тензора абсолютной проницаемости второго ранга на базе метода давления и решения обратной коэффициентной задачи;

**реализованы** в виде программного комплекса вычислительные схемы стабилизированного метода конечных элементов и разрывного метода Галёркина для моделирования процесса фильтрации жидкости в многомасштабной гетерогенной среде в трёхмерной постановке;

**реализован** в виде программного комплекса алгоритм вычисления эффективного тензора абсолютной проницаемости второго ранга;

**установлено**, что несимметричная постановка разрывного метода Галёркина показывает более высокую точность и устойчивость при решении широкого класса жёстких задач о просачивании однофазного флюида в геологической среде;

**показана** устойчивость предложенного алгоритма вычисления эффективного тензора абсолютной проницаемости второго ранга на классе задач, приближенных к реальным, с зашумлением модели наблюдения до 10%;

**получены** результаты численного моделирования процесса просачивания жидкости в пористых средах, которые позволили **обнаружить** существование порога объёмной равномерной пористости гетерогенной среды, при котором возможен переход от анизотропной модели абсолютной проницаемости к изотропной;

**получены** результаты численного моделирования процесса просачивания жидкости в трещиновато-пористых средах при использовании изотропной модели абсолютной проницаемости, в которых величина вычисленного модуля скорости потоков флюида в поровом пространстве расходится с данными физического эксперимента не более чем на 10%.

**Теоретическая значимость исследования обоснована тем, что:**

**применительно к проблематике диссертации результативно (с получением обладающих новизной результатов) использованы** методы математического моделирования и механики сплошных сред, численные методы и эксперименты;

**предложены** усовершенствованные варианты стабилизированного конформного метода конечных элементов и неконформного разрывного метода Галёркина;

**изучены** существующие математические модели процесса фильтрации жидкостей в геологических средах и вычислительные схемы для их дискретизации, обоснована необходимость разработки усовершенствованных вычислительных схем на базе конформных и неконформных методов конечных элементов для дискретизации моделей фильтрации жидкостей в многомасштабных гетерогенных средах с учётом анизотропной природы абсолютной проницаемости;

**изучены** существующие алгоритмы вычисления коэффициента абсолютной проницаемости геологических сред, обоснована необходимость разработки алгоритма вычисления эффективного тензора абсолютной проницаемости многомасштабных гетерогенных сред;

**показана** возможность применения аппарата математического моделирования для изучения процесса фильтрации в многомасштабных гетерогенных средах с учётом анизотропной природы абсолютной проницаемости.

**Значение полученных соискателем результатов исследования для практики подтверждается тем, что:**

**разработаны и реализованы** в виде программного комплекса усовершенствованные вычислительные схемы на базе конформных и неконформных конечноэлементных методов для многомасштабного моделирования процесса фильтрации жидкостей в геологических средах с учётом анизотропной природы абсолютной проницаемости;

**разработан и реализован** в виде программного комплекса алгоритм вычисления эффективного тензора абсолютной проницаемости второго ранга; разработанные программные комплексы были использованы для решения задач в проектах ОФИ-М «Многомасштабное, многофизичное моделирование естественных и искусственных электромагнитных полей в задачах наземной и морской геоэлектрики (№ 13-05-12031)», «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 (№ 16-29-15094)»;

**показано**, что полученные с помощью разработанного программного комплекса результаты численного моделирования могут быть использованы для исследования процесса фильтрации несжимаемой жидкости в многомасштабной геологической среде при проведении гидравлического разрыва пласта и исследовании транспортно-фильтрационных свойств породы-коллектора;

**установлены** границы применимости анизотропной и изотропной моделей проницаемости для слоистых и пористых сред;

**обоснована** возможность применения разработанного комплекса программ для проведения исследований недр и природных ресурсов.

**Достоверность и обоснованность результатов исследования обеспечивается:**

**использованием** законов сохранения в качестве основы моделирования;



**количественным совпадением** результатов расчетов с реальными данными по коэффициенту абсолютной проницаемости и скорости просачивания жидкости в геологических средах.

**Личный вклад соискателя состоит** в непосредственном участии в формулировке задач, разработке и верификации вариационных формулировок конформного стабилизированного метода конечных элементов и неконформного разрывного метода Галёркина для моделирования процесса фильтрации в многомасштабной геологической среде, разработке и верификации алгоритма вычисления тензора абсолютной проницаемости породы-коллектора, реализации программного комплекса на языках программирования C++ и C#, планировании и проведении вычислительных экспериментов, анализе и интерпретации полученных результатов, представлении материала и подготовке публикаций по выполненной работе.

На заседании 27 июня 2019 г. диссертационный совет принял решение **присудить Маркову С.И. ученую степень кандидата физико-математических наук.**

При проведении тайного голосования диссертационный совет в количестве 17 человек, из них 6 докторов наук по специальности 05.13.18 – «Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ» (физико-математические науки), участвовавших в заседании, из 23 человек, входящих в состав совета, проголосовали: за – 16, против – 0, недействительных бюллетеней – 1.

Председатель

диссертационного совета  
академик



Шокин Юрий Иванович

Ученый секретарь  
диссертационного совета  
к.ф.-м.н.

Лебедев Александр Степанович

«1» июня 2019 г.