

ЗАКЛЮЧЕНИЕ ДИССЕРТАЦИОННОГО СОВЕТА Д.212.173.06, СОЗДАННОГО НА  
БАЗЕ ФЕДЕРАЛЬНОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО БЮДЖЕТНОГО  
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОГО УЧРЕЖДЕНИЯ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ  
«НОВОСИБИРСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»  
МИНИСТЕРСТВА НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ  
ФЕДЕРАЦИИ, ПО ДИССЕРТАЦИИ НА СОИСКАНИЕ УЧЕНОЙ  
СТЕПЕНИ КАНДИДАТА НАУК

аттестационное дело № \_\_\_\_\_

решение диссертационного совета от 21.09.2022 г. протокол № 10

О присуждении Патрушеву Илье Игоревичу, гражданину Российской Федерации, ученой степени кандидата технических наук.

Диссертация «Разработка методов оптимизации процессов нефтедобычи на основе трехмерного численного моделирования изотермической многофазной фильтрации» по специальности 05.13.18 – Математическое моделирование численные методы и комплексы программ принята к защите от 24.06.2022 г. (протокол заседания № 20) диссертационным советом Д 212.173.06 на базе Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Новосибирский государственный технический университет», Министерство науки и высшего образования РФ, 630073, г. Новосибирск, пр. Карла Маркса, 20, № 105/нк от 11.04.2012 г.

Соискатель Патрушев Илья Игоревич 2 декабря 1993 года рождения. В 2018 году соискатель окончил магистратуру по направлению «Прикладная математика и информатика» Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Новосибирский государственный технический университет». В период подготовки диссертации соискатель обучался в аспирантуре Новосибирского государственного технического университета по направлению 09.06.01 – «Информатика и вычислительная техника», нормативный период обучения с 01.09.2018 г. по 31.08.2022 г. Патрушев И.И. работает ассистентом кафедры прикладной математики в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Новосибирский государственный технический университет».

Диссертация выполнена на кафедре прикладной математики Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования

«Новосибирский государственный технический университет», Министерство науки и высшего образования РФ.

Научный руководитель – доктор технических наук, профессор Персова Марина Геннадьевна, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Новосибирский государственный технический университет», научно-исследовательская лаборатория моделирования и обработки данных наукоемких технологий, заведующая научно-исследовательской лабораторией.

Официальные оппоненты:

Пушкарев Павел Юрьевич, доктор геолого-минералогических наук, доцент, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова», профессор геологического факультета, кафедры геофизических методов исследования земной коры;

Белая Анастасия Александровна, кандидат технических наук, Акционерное общество «ЕМ-разведка», заведующая лабораторией математического моделирования, дали положительные отзывы на диссертацию.

Ведущая организация Федеральное государственное бюджетное учреждение науки «Институт вычислительной математики и математической геофизики Сибирского отделения Российской академии наук», г. Новосибирск, в своем положительном заключении, утвержденным директором Федерального государственного бюджетного учреждения науки «Институт вычислительной математики и математической геофизики Сибирского отделения Российской академии наук», профессором РАН, д.ф.-м.н. Марченко Михаилом Александровичем, подписанном Виктором Митрофановичем Свешниковым, д.ф.-м.н., г.н.с. лаборатории вычислительной физики, указала, что

«Диссертационная работа Патрушева И.И. «Разработка методов оптимизации процессов нефтедобычи на основе трехмерного численного моделирования изотермической многофазной фильтрации» представляет собой научно-квалификационную работу, в которой предложены методы и подходы, реализующие решение актуальной научной и практической проблемы.

Работа соответствует требованиям «Положения о присуждении ученых степеней» и специальности 05.13.18 – Математическое моделирование, численные

методы и комплексы программ, поскольку в работе присутствуют результаты по всем трем составляющим специальности:

1) Математическое моделирование:

-предложена математическая модель управления разработкой нефтяных месторождений, базирующаяся на специальной параметризации режимов работы скважин, использовании полного гидродинамического моделирования и трехмерных цифровых моделей месторождений, полученных в результате автоадаптации по данным истории разработки

2) Численные методы:

-разработан алгоритм группирования и основанная на нем модификация переноса фаз, допускающие разные шаги по времени для пересчета состояния ячеек, что позволяет значительно сократить вычислительные затраты при моделировании многофазных потоков в пористых средах

3) Комплексы программ:

-разработана подсистема программного комплекса для построения оптимизированных планов разработки нефтяных месторождений с применением химических методов увеличения нефтеотдачи пласта.

Диссертационная работа Патрушева И.И. соответствует следующим пунктам паспорта специальности:

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.

Автор диссертации, Патрушев Илья Игоревич, заслуживает присуждения ему ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.13.18 – Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ».

Соискатель имеет всего 39 научных работ, из них по теме диссертации – 22, включая 3 публикации в журналах, входящих в перечень ВАК РФ, 13 публикаций, индексируемых в международных информационно-аналитических системах научного цитирования Web of Science и/или Scopus, из которых 3 публикации из журналов

квартиля Q1. Общий авторский вклад не менее 3,5 п.л. Получено 4 свидетельства о государственной регистрации программ для ЭВМ. Получен акт внедрения. Недостоверные сведения об опубликованных работах отсутствуют.

Перечень наиболее значимых работ автора, в которых отражено основное содержание диссертационной работы и ее результатов:

1. Применение процедуры группирования конечных элементов для повышения эффективности моделирования нестационарного многофазного потока в высоконеоднородных трехмерных пористых средах / Персова М.Г., Соловейчик Ю.Г., Патрушев И.И., Овчинникова А.С. // Вестн. Том. гос. ун-та. Управление, вычислительная техника и информатика. 2021, № 57, С. 34–44.

*Соискателем разработан и реализован алгоритм группирования и упорядочивания конечных элементов в вычислительной схеме переноса фаз, учитывающей разные шаги по времени для пересчета состояния ячеек.*

2. Численное моделирование нефтедобычи с применением ПАВ-полимерного заводнения / Персова М.Г., Соловейчик Ю.Г., Патрушев И.И., Овчинникова А.С. // Известия Саратовского университета. Новая серия. Серия: Математика. Механика. Информатика. 2021. Т. 21, № 4. С. 544–558.

*Соискателем выполнено исследование технологии заводнения с использованием растворов полимера и поверхностно-активных веществ при разработке месторождения высоковязкой нефти.*

3. Конечноэлементное моделирование многофазных потоков с их балансировкой при фиксировании рабочего давления на скважинах в процессе нефтедобычи / Овчинникова А.С., Патрушев И.И., Гриф А.М., Персова М.Г., Соловейчик Ю.Г. // Вычислительные методы и программирование. 2022, Т. 23, №1. С. 60–74.

*Соискателем выполнены исследования сходимости численных решений на вложенных сетках с фиксацией численных потоков смеси на зонах перфораций скважин, работающих при фиксированном давлении.*

4. A method of FE modeling multiphase compressible flow in hydrocarbon reservoirs / Soloveichik Y.G., Persova M.G., Grif A.M., Ovchinnikova A.S., Patrushev I.I., Vagin D.V., Kiselev D.S. // Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering. Elsevier B.V., 2022. Vol. 390. Art. 114468. (Q1 WoS/ Q1 Scopus)

*Соискателем разработан, реализован и исследован на модели реального месторождения алгоритм группирования и упорядочивания конечных элементов в вычислительной схеме переноса фаз, учитывающей разные шаги по времени для пересчета состояния ячеек.*

5. The design of high-viscosity oil reservoir model based on the inverse problem solution / Persova M.G., Soloveichik Y.G., Vagin D. V., Grif A.M., Kiselev D.S., Patrushev I.I., Nasybullin A.V., Ganiev B.G. // Journal of Petroleum Science and Engineering. Elsevier B.V., 2021. Vol. 199. Art. 108245. (Q1 WoS/ Q1 Scopus)

*Соискателем построена одна из используемых в исследованиях цифровая модель месторождения Республики Татарстан.*

6. Synthesis of the optimal scheme polymer flooding with constraints on the bottomhole pressure / Patrushev I.I. // Actual problems of electronic instrument engineering (APEIE–2021) : proc. of the 15 intern. sci. and techn. conf., Novosibirsk, 19–21 Nov. 2021. Novosibirsk : Publ. NSTU, 2021. P. 543–546.

7. Numerical 3D simulation of enhanced oil recovery methods for high-viscosity oil field / Persova M.G., Soloveichik Y.G., Ovchinnikova A.S., Patrushev I.I., Nasybullin A.V., Orekhov E.V. // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. IOP Publishing Ltd, 2021. Vol. 1019, № 1, Art. 012050.

*Соискателем выполнены исследования воздействия поверхностно-активных веществ с механизмом вымывания остаточной нефти при разработке месторождения высоковязкой нефти.*

8. Analysis of the polymer flooding efficiency in one of the high-viscosity oil fields based on mathematical modeling / M.G. Persova, Y.G. Soloveichik, A.S. Ovchinnikova, Kiselev D.S., Patrushev I.I. // Геомодель 2021: 23 науч.-практ. конф. по вопросам геологоразведки и разработки месторождений нефти и газа, Геленджик, 6–10 сент. 2021 г. Геленджик, : EAGE, 2021. Ст. 48.

*Соискателем проведена серия численных экспериментов для исследования эффективности полимерного заводнения при разработке месторождения высоковязкой нефти.*

9. Oil production optimization based on the finite-element simulation of the multi-phase flow in porous media and inverse problem solution / Persova M.G., Soloveichik Y.G., Vagin D.V., Grif A.M., Patrushev I.I., Ovchinnikova A.S. // ГеоБайкал 2020 : материалы конф., Иркутск, окт. 2020 г. Иркутск : EAGE, 2020. С. 1–6.

*Соискателем разработан, реализован и продемонстрирован метод построения оптимизированных планов разработки нефтяных месторождений.*

10. The approach to the automatic adaptation of a high-viscosity oil field hydrodynamic model based on the multidimensional inverse problem of multi-phase filtration [Electronic resource] / Persova M.G., Soloveichik Y.G., Vagin D.V., Grif A.M., Ovchinnikova A.S., Patrushev I.I., Nasybullin A.V., Orekhov E.V. // Геомодель 2019 : 21 науч.-практ. конф. по вопросам геологоразведки и разработки месторождений нефти и газа, Геленджик, 9–13 сент. 2019 г. Москва : EAGE publ., Vol. 2019, № 1.

*Соискателем построена одна из используемых в исследовании цифровая модель месторождения Республики Татарстан.*

11. Numerical modeling of multi-phase flow for various junctions of water and oil saturated layers in 3-D porous media / Persova M.G., Soloveichik Y.G., Patrushev I.I., Grif A.M. // Актуальные проблемы электронного приборостроения (АПЭП–2018): тр. 14 междунар. науч.-техн. конф., Новосибирск, 2–6 окт. 2018 г. : в 8 т. Новосибирск : Изд-во НГТУ, 2018. Т. 1, ч. 4. С. 212–215.

*Соискателем реализовано решение краевой задачи для расчета поля давления методом конечных элементов и реализована схема переноса фаз при моделировании изотермического несжимаемого многофазного потока в пористых средах без учета гравитации и сжимаемости матрицы-породы.*

На диссертацию и автореферат поступили 6 отзывов (все положительные):

1. Долгаль Александр Сергеевич, доктор физико-математических наук, «Горный институт Уральского отделения Российской академии наук» - филиал Федерального государственного бюджетного учреждения науки Пермского федерального исследовательского центра Уральского отделения Российской академии наук, главный научный сотрудник.

*Без замечаний.*

2. Давыденко Юрий Александрович, кандидат технических наук, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Иркутский национальный исследовательский технический университет», Институт «Сибирская Школа Геонаук», исполнительный директор.

*Замечание.* В автореферате указано, что для оптимизации используется метод Гаусса-Ньютона. При этом неясно, как рассчитываются чувствительности к

изменению параметров? Каковы ограничения предложенного метода по количеству параметров, скважин и др.?

3. Рыбаков Акрам Александрович, кандидат технических наук, Государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Альметьевский государственный нефтяной институт», кафедра «Разработка и эксплуатация нефтяных и газовых месторождений», доцент.

*Замечание.* При проектировании разработки на практике часто возникает необходимость наложения ограничений на характеристики добычи для группы скважин. Можно ли реализовать это в рамках предложенного подхода?

4. Плавник Андрей Гарьевич, доктор технических наук, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Тюменский индустриальный университет», Западно-Сибирский институт проблем геологии нефти и газа, и.о. директора.

*Замечания.* 1) Из текста автореферата не ясно, какое может быть количество управляющих параметров, приемлемое для решения практических задач.

2) Из текста автореферата не ясно, какие параметры определяются при решении обратных задач, и что делает подсистема анализа параметров работы фонда скважин.

3) В рамках принятой модели несжимаемых фаз реализуется только стационарный режим фильтрации. Это определяется независимостью от времени уравнения неразрывности потока (1). Нестационарность в гидродинамическую модель, очевидно, вводится косвенным, искусственным образом, как последовательная смена стационарных состояний поля давлений для изменяющихся условий фазового состава за некоторый расчетный промежуток времени.

5. Низаев Рамиль Хабутдинович, доктор технических наук, доцент, Татарский научно-исследовательский и проектный институт нефти публичного акционерного общества «Татнефть» имени В.Д. Шашина, ведущий научный сотрудник.

*Замечание.* В автореферате представлена схема комплекса моделирования и оптимизации нефтедобычи, из которой видно, что расчеты могут выполняться в параллельном режиме на нескольких вычислительных узлах. Возникает вопрос, какие задачи распределяются по узлам, и какова эффективность реализованных методов распараллеливания?

6. Рыбаков Алексей Владимирович, кандидат технических наук, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Астраханский государственный университет им. В.Н. Татищева», физико-математический институт, и.о. директора.

*Замечание.* В качестве замечания можно отметить отсутствие обоснования выбора метода минимизации целевой функции.

Выбор официальных оппонентов и ведущей организации обосновывается их достижениями в данной отрасли науки, наличием публикаций в соответствующей сфере исследования и способностью определить научную и практическую ценность диссертации.

Ведущая организация Федеральное государственное бюджетное учреждение науки «Институт вычислительной математики и математической геофизики Сибирского отделения Российской академии наук» много лет занимается методами вычислительной математики и решением различных геофизических задач, включая задачи многофазной фильтрации.

Д.г.-м.н., доцент Пушкарев Павел Юрьевич – специалист в области обработки геолого-геофизических данных для построения моделей земной коры на основе численного многомерного моделирования и решения оптимизационных задач.

К.т.н. Белая Анастасия Александровна – специалист в области математического моделирования и разработки программного обеспечения для построения геолого-геофизических моделей месторождений полезных ископаемых.

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

**разработана** математическая модель управления разработкой нефтяных месторождений;

**разработаны** методы оптимизации нефтедобычи при различных способах заводнения с использованием параметризации режимов работы скважин, позволяющей управлять мощностями добычи/закачки, концентрацией закачиваемых агентов и границами временных интервалов изменений режимов работы скважин;

**предложена** методика использования разработанного метода для построения оптимальных планов разработки месторождений;



**разработан** алгоритм группирования конечных элементов, который позволяет рассчитывать новые компонентно-фазовые составы ячеек с использованием разных шагов по времени для разных ячеек, и соответствующая модификация схемы переноса фаз;

**разработана** подсистема программного комплекса моделирования и оптимизации разработки нефтяных месторождений;

**показана** корректность работы программных реализаций при решении оптимизационных задач, в том числе с использованием практических данных.

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

разработанные методы построения оптимизированных планов разработки нефтяных месторождений могут служить теоретической базой для дальнейшего развития методов автоматической оптимизации процессов нефтедобычи с использованием полного гидродинамического моделирования;

разработанные алгоритм группирования конечных элементов и модификация вычислительной схемы переноса фаз могут служить основой для дальнейшего совершенствования вычислительных схем моделирования процессов многофазной фильтрации;

**применительно к проблематике диссертации результативно (эффективно, то есть с получением обладающих новизной результатов) использован метод Гаусса-Ньютона с адаптивной регуляризацией для минимизации целевой функции в ходе построения оптимизированных планов разработки нефтяных месторождений.**

**Значение полученных соискателем результатов исследования для практики подтверждается тем, что** разработанная подсистема оптимизации программного комплекса была применена для синтеза оптимального управления режимами работы скважин на нескольких месторождениях Республики Татарстан, о чем свидетельствует акт внедрения результатов диссертационной работы в Альметьевском государственном нефтяном институте при проведении работ по заказу ПАО «Татнефть».

Работа проводилась при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований в рамках проекта № 20-31-90049 «Синтез оптимального управления разработкой месторождения при применении методов увеличения нефтеотдачи».

**Оценка достоверности результатов исследования выявила:** верификация разработанного алгоритма группирования ячеек при решении задач многофазной фильтрации проведена сравнением результатов, получаемых при решении одних и тех же задач с группированием и без, а также на задаче из сравнительного проекта SPE путем сравнения с результатами, полученными в программных комплексах гидродинамического моделирования зарубежных компаний. Обоснование достоверности прогнозов нефтедобычи, полученных в результате оптимизации, проведено на синтетических данных, полученных по модели месторождения, построенной по практическим данным.

**Личный вклад соискателя состоит:** в разработке, программной реализации и исследовании эффективности модифицированной вычислительной схемы переноса фаз между конечными элементами из групп с разными шагами по времени; в разработке и программной реализации методов и алгоритмов оптимизации планов разработки нефтяных месторождений; в проведении исследований, подтверждающих корректность разработанного модуля переноса фаз между конечными элементами из групп с разными шагами по времени; в проведении исследований повышения эффективности нефтедобычи при различных способах заводнения с использованием растворов полимера и поверхностно-активных веществ на моделях нефтяных месторождений; в обработке данных нефтедобычи на месторождениях высоковязкой нефти Республики Татарстан с построением их цифровых моделей; в проведении исследований, демонстрирующих корректность выполнения автоматизированной оптимизации планов разработки нефтяных месторождений.

В ходе защиты диссертации соискателю были заданы вопросы: об особенностях метода оптимизации целевого функционала, о виде целевой функции, об учете ограничений на значения варьируемых параметров, о многокритериальности оптимизационной задачи, о способе вычисления производных при линеаризации различных критериев, об использовании метода конечных элементов.

Соискатель Патрушев И.И. аргументировано ответил на все заданные ему в ходе заседания вопросы.

На заседании 21.09.2022 г. диссертационный совет принял решение за разработку нового научно обоснованного метода автоматизированной оптимизации планов

разработки нефтяных месторождений различными способами заводнения присудить Патрушеву И.И. ученую степень кандидата технических наук.

При проведении тайного голосования диссертационный совет в количестве 17 человек, из них 5 докторов наук по специальности 05.13.18, участвовавших в заседании, из 25 человек, входящих в состав совета, дополнительно введены на разовую защиту - нет, проголосовали: за 16, против нет, недействительных бюллетеней 1.

Председатель  
диссертационного

Ученый секретарь  
диссертационного

 Лемешко Борис Юрьевич

Фаддеенков Андрей Владимирович

21 сентября 2022 г.