

ЗАКЛЮЧЕНИЕ ДИССЕРТАЦИОННОГО СОВЕТА 24.2.479.03,  
СОЗДАННОГО НА БАЗЕ ФЕДЕРАЛЬНОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО  
БЮДЖЕТНОГО ОБРАЗОВАТЕЛЬНОГО УЧРЕЖДЕНИЯ ВЫСШЕГО  
ОБРАЗОВАНИЯ «УФИМСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ НАУКИ И  
ТЕХНОЛОГИЙ» МИНИСТЕРСТВА НАУКИ И ВЫСШЕГО  
ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ, ПО ДИССЕРТАЦИИ НА  
СОИСКАНИЕ УЧЕНОЙ СТЕПЕНИ ДОКТОРА НАУК

аттестационное дело № \_\_\_\_\_  
решение диссертационного совета от 20.06.2024 г. № 3

О присуждении Шевелёву Александру Павловичу, гражданину Российской Федерации, ученой степени доктора физико-математических наук.

Диссертация «Комплексная методология моделирования процессов теплопереноса в приложении к задачам подземной гидромеханики» по научной специальности 1.3.14. Теплофизика и теоретическая теплотехника принята к защите 21 февраля 2024 года, протокол заседания № 1, диссертационным советом 24.2.479.03, созданным на базе Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Уфимский университет науки и технологий», Министерство науки и высшего образования Российской Федерации, 450076, Республика Башкортостан, г. Уфа, ул. Заки Валиди, 32. Приказ Минобрнауки о создании диссертационного совета № 518/нк от 24.03.2023 г.

Соискатель Шевелёв Александр Павлович 28 октября 1979 года рождения. В 2002 году окончил Тюменский государственный университет по специальности «Физика» с присвоением квалификации Физик.

Диссертацию на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук на тему «Математическое моделирование циклического теплового воздействия на нефтяные пласты» по научной специальности 01.02.05 – Механика жидкости, газа и плазмы защитил в 2005 году в диссертационном совете Д 212.274.09 при Федеральном государственном образовательном учреждении высшего профессионального образования «Тюменский государственный университет».

Работает в должности профессора кафедры моделирования физических процессов и систем Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Тюменский

государственный университет» Министерства науки и высшего образования Российской Федерации.

Диссертация выполнена на кафедре моделирования физических процессов и систем Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Тюменский государственный университет» Министерства науки и высшего образования Российской Федерации.

Научный консультант – доктор физико-математических наук, профессор, Федоров Константин Михайлович, профессор кафедры моделирования физических процессов и систем Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Тюменский государственный университет».

Официальные оппоненты:

1. Каневская Регина Дмитриевна, доктор технических наук (01.02.05 – Механика жидкости, газа и плазмы), профессор, Акционерное общество «Институт геологии и разработки горючих ископаемых», начальник отдела научно-технического развития и моделирования;

2. Шарафутдинов Рамиль Фаизырович, доктор физико-математических наук (01.04.14 – Теплофизика и молекулярная физика; 04.00.12 – Геофизические методы поисков и разведки месторождений полезных ископаемых), профессор, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Уфимский университет науки и технологий», профессор кафедры геофизики;

3. Никифоров Анатолий Иванович, доктор физико-математических наук (01.02.05 – Механика жидкости, газа и плазмы), профессор, Академик РАН, Институт механики и машиностроения – обособленное структурное подразделение Федерального государственного бюджетного учреждения науки «Федеральный исследовательский центр «Казанский научный центр Российской академии наук», заведующий лабораторией математического моделирования процессов фильтрации

дали положительные отзывы на диссертацию.

Ведущая организация – Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Уфимский государственный нефтяной технический университет», г. Уфа в своем положительном отзыве, подписанном доктором технических наук (05.15.13 – Строительство и эксплуатация нефтегазопроводов, баз и хранилищ), профессором, заведующим кафедрой «Промышленная теплоэнергетика»

Байковым Игорем Равильевичем и кандидатом физико-математических наук (01.02.05 – Механика жидкости, газа и плазмы), доцентом кафедры «Физика» Столповским Максимом Владимировичем и утвержденном ректором ФГБОУ ВО «Уфимский государственный нефтяной технический университет», кандидатом технических наук, доцентом Баулиным Олегом Александровичем, указала, что диссертация Шевелёва Александра Павловича, представленная на соискание ученой степени доктора физико-математических наук, является завершённой и представляет собой цельную научную работу. Автореферат написан качественным научным языком и в полной мере отражает основные положения диссертационной работы. Полученные в работе результаты физически не противоречивы и обоснованы, обладают научной новизной, имеют несомненную теоретическую и практическую значимость. Результаты исследований могут быть применимы для проектирования разработки месторождений с трудноизвлекаемыми запасами и объектов, находящихся на поздней стадии разработки. Докторская диссертация содержит ряд физико-математических моделей, методов и решений уравнений теплопереноса в пористой среде при реализации различных процессов интенсификации притока нефти. Именно по результатам решений формулируются основные выводы из проведенного исследования. Диссертационная работа полностью соответствует требованиям пунктов 9-11, 13 и 14 Положения о порядке присуждения ученых степеней, утвержденного Постановлением Правительства РФ от 24.09.2013 № 842, предъявляемым к докторским диссертациям, а ее автор, Александр Павлович Шевелев, заслуживает присуждения ученой степени доктора физико-математических наук по научной специальности 1.3.14. Теплофизика и теоретическая теплотехника.

Соискатель имеет 58 опубликованных работ, из которых 27 в изданиях, входящих в международные базы данных, 11 в изданиях, входящих в перечень рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертации на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание ученой степени доктора наук, 4 в изданиях, индексируемых базой данных Russian Science Citation Index, 2 в иных изданиях и 14 в тезисах и материалах конференций. Имеется 8 свидетельств о государственной регистрации программы для ЭВМ. Общий объем публикаций 34,7 п.л. (авторский вклад – 11,1 п.л.).

Наиболее значительные научные работы по теме диссертации:

1. Gilmanov A. Ya. Optimization of steam assisted gravity drainage in verified integral simulator / A. Ya. Gilmanov, K. M. Fedorov, A. P. Shevelev // Инженерно-физический журнал. – 2023. – Т. 96, № 1. – С. 190–198.
2. Gil'manov A. Ya. Influence of convective processes on technological parameters of cyclic steam stimulation of oil reservoirs / A. Ya. Gil'manov, A. R. Arazov, A. P. Shevelev // Journal of Engineering Physics and Thermophysics. – 2022. – Vol. 95, № 5. – P. 1190–1197. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10891-022-02583-y> (перевод Гильманов А. Я. Влияние конвективных процессов на технологические параметры пароциклического воздействия на нефтяные пласты / А. Я. Гильманов, А. Р. Аразов, А. П. Шевелёв // Инженерно-физический журнал. – 2022. – Т. 95, № 5. – С. 1190–1197).
3. Gil'manov A. Ya. Criteria for the stability of displacement processes during the production of hydrocarbons / Ya. A. Kryazhev, V. A. Kryazhev, A. Ya. Gil'manov, A. P. Shevelev // Journal of Engineering Physics and Thermophysics. – 2022. – Vol. 95, № 5. – P. 1176–1182. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10891-022-02581-0> (перевод Кряжев Я. А. Критерии устойчивости процессов вытеснения при добыче углеводородов / Я. А. Кряжев, В. А. Кряжев, А. Я. Гильманов, А. П. Шевелёв // Инженерно-физический журнал. – 2022. – Т. 95, № 5. – С. 1176–1182).
4. Gil'manov A. Ya. Mathematical modeling of the process of steam-assisted gravity drainage during the extraction of high-viscosity oil / A. Ya. Gil'manov, K. M. Fedorov, A. P. Shevelev // Journal of Engineering Physics and Thermophysics. – 2021. – Vol. 94, № 3. – P. 592–601. DOI: [10.1007/s10891-021-02333-6](https://doi.org/10.1007/s10891-021-02333-6) (перевод Гильманов А. Я. Математическое моделирование процесса парогравитационного дренажа при добыче высоковязкой нефти / А. Я. Гильманов, К. М. Фёдоров, А. П. Шевелёв // Инженерно-физический журнал. – 2021. – Т. 94, № 3. – С. 611–620).
5. Gil'manov A. Ya. Problem of blocking a technogenic fracture in the reservoir using a suspension mixture / A. Ya. Gil'manov, K. M. Fedorov, A. P. Shevelev // Fluid Dynamics. – 2022. – Vol. 57, № 6. – P. 720–728. DOI: [10.1134/S0015462822600936](https://doi.org/10.1134/S0015462822600936) (перевод Гильманов А. Я. Задача о блокировании техногенной трещины в пласте суспензионной смесью / А. Я. Гильманов, К. М. Фёдоров, А. П. Шевелёв // Известия РАН. Механика жидкости и газа. – 2022. – Т. 57, № 6. – С. 27–35. DOI: [10.31857/S0568528122600230](https://doi.org/10.31857/S0568528122600230)).
6. Гильманов А. Я. Расчёт распределения температуры в пласте на стадии инициации процесса парогравитационного дренажа / А. Я. Гильманов,

А. П. Шевелёв // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2022. – Т. 333, № 5. – С. 108–115. DOI: 10.18799/24131830/2022/5/3489.

7. Fedorov K. M. A theoretical analysis of profile conformance improvement due to suspension injection / K. M. Fedorov, A. Ya. Gilmanov, A. P. Shevelev, A. V. Kobyashev, D. A. Anuriev // Mathematics. – 2021. – Vol. 9, Issue 15. – P. 1727–1741. DOI: 10.3390/math9151727.

8. Gil'manov A. Ya. Integral model of steam-assisted gravity drainage / A. Ya. Gil'manov, K. M. Fedorov, A. P. Shevelev // Fluid Dynamics. – 2020. – Vol. 55, № 6. – P. 793–803. DOI: 10.1134/S0015462820060051 (перевод Гильманов А. Я. Интегральная модель парогравитационного дренажа / А. Я. Гильманов, К. М. Фёдоров, А. П. Шевелёв // Известия РАН. Механика жидкости и газа. – 2020. – Т. 55, № 6. – С. 74–84. DOI: 10.31857/S0568528120060055).

В диссертации отсутствуют недостоверные сведения об опубликованных соискателем работах.

На диссертацию и автореферат поступили отзывы:

**1. Ведущей организации** – Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Уфимский государственный нефтяной технический университет». Отзыв положительный.

Имеются замечания: 1) Определенный интерес представляет сравнение эффективности применения пароциклического и парогравитационного дренажа на одном и том же объекте разработки на основе модельных расчетов, однако такое сравнение не приводится в исследованиях. 2) В работе приведена валидация физико-математической модели парогравитационного дренажа по зарубежным месторождениям, однако отсутствует валидация модели по данным российских месторождений. 3) Из текста диссертации остается непонятным, возможно ли применение для слабоизученных месторождений разработанного алгоритма, построенного в результате анализа усредненных насыщенностей фаз в пласте в специальном фазовом пространстве, позволяющего минимизировать неопределенность решения задачи о вытеснении нефти смесью воды и газа. 4) Недостаточно акцентировано сравнение оптимального объема закачки суспензии на основе бентонитовой глины и мела, определенного в результате применения метода решения многомасштабной задачи выравнивания фильтрационных потоков, с данными промысловых исследований. 5) Из текста диссертации остается

неясным, применима ли разработанная физико-математическая модель блокирования трещины авто ГРП для расчета закачки других реагентов в трещину, кроме суспензии.

**2. Официального оппонента**, доктора технических наук, профессора, начальника отдела научно-технического развития и моделирования Акционерного общества «Институт геологии и разработки горючих ископаемых» Каневской Регины Дмитриевны. Отзыв положительный.

Имеются вопросы и замечания: 1) Пункт 6 разработанной автором комплексной методологии предусматривает решение оптимизационных задач. При этом не указано, как следует отыскивать оптимум предложенных критериев: путем проведения многовариантных расчетов или с использованием каких-либо методов оптимизации (например, рис. 9, 7б, 16 автореферата и др.). 2) В диссертации с применением методологии автора рассмотрен ряд классических задач, которым и ранее уделялось большое внимание. В частности, условие устойчивости вытеснения в наклонном пласте были получены И.А. Чарным (например, «Подземная гидрогазодинамика», параграф 7 гл. VII) и имеют схожий вид. В диссертации отсутствуют ссылки на эти работы. 3) Аналогичная ситуация имеет место при рассмотрении фильтрации с предельным градиентом. Необходимо пояснить, в чем преимущества и отличия результатов автора от полученных В.М. Ентовым (см. например, Баренблатт, Ентов, Рыжик «Движение жидкостей и газов в природных пластах», параграф 3, гл. 3). 4) В некоторых местах диссертации имеется путаница в терминологии. Например, при рассмотрении устойчивости вытеснения на стр. 106-107 для случаев поршневого вытеснения приведена модель двухфазной фильтрации Баклея-Левретта, причем уравнение приведено для радиального притока, тогда как далее, судя по всему, речь идет о линейном течении (постоянная скорость, а не расход). Условия устойчивости Саффмана-Тейлора в классической постановке соответствуют случаю течения в горизонтальной плоскости (без учета гравитации), в связи с этим не понятно, как соотносятся соотношения (3.4.10)-(3.4.11) и (3.4.13) в диссертации или (36) и (39) в автореферате. 5) В работе показано, как влияет на устойчивость вытеснения соотношение вязкостей фаз, в том числе и для случая непоршневого вытеснения, например, рис. 10б автореферата. При этом не рассматривается влияние такого важного фактора, как вид фазовых проницаемостей. 6) Следует пояснить систему уравнений (4.2.1)-(4.2.8), где левая часть уравнений сохранения приведена к стандартным условиям с учетом растворимостей  $R_{og}$

и  $R_{go}$ , а в правую входят мольные концентрации и плотности в пластовых условиях. Что значит «плотность одного моля»? 7) В левой части уравнения (2.3.11) диссертации и (23) автореферата пропущена плотность нефти. 8) Пояснить, почему в работе для определения типа смачиваемости породы используется величина капиллярного числа, которое пропорционально приложенному градиенту давления, то есть зависит от текущей скорости фильтрации (стр. 146). 9) Алгоритм, позволяющий минимизировать неопределенность решения задачи о вытеснении нефти смесью воды и газа, используются значения насыщенности, осредненные по всему пласту. Как они определяются? 10) Интересно было бы рассмотреть возможность учета реологии суспензии в задачах, описывающих процессы выравнивания потоков в слоистом пласте и коагуляции трещины (главы 5 и 6). 11) Валидация модели парогравитационного дренажа выполнена путем сопоставления с промысловыми данными по одному из месторождений США. Почему предполагается, что на промысле были реализованы именно оптимальные параметры воздействия – длительность закачки пара и всего цикла воздействия? 12) Недостаточно подробно освещены сложности моделирования задач тепломассопереноса в пористых средах при пароциклическом дренаже и при водогазовом воздействии с использованием стандартных коммерческих пакетов, а также особенности последующего перехода к безразмерным переменным для сопоставления с результатами автора. Необходимо выполнить верификацию упрощенных моделей автора путем сопоставления с расчетами, использующими коммерческие симуляторы. К чему приводят упрощения? 13) Интересно было бы более подробно пояснить, как проводятся расчеты по валидации моделей, в частности в главе 6.

**3. Официального оппонента**, доктора физико-математических наук, профессора, профессора кафедры геофизики Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Уфимский университет науки и технологий» Шарафутдинова Рамиля Фаизыровича. Отзыв положительный.

Имеются вопросы и замечания: 1) В пункте научная новизна не хватает численных показателей, характеризующих моделируемые процессы (например, какие параметры и как влияют на процесс парогравитационного дренажа, чему равны значения безразмерных критериев, характеризующие устойчивость вытеснения нефти и т.д.). 2) В первой главе приведена валидация физико-математической модели пароциклического дренажа путем

сопоставления результатов расчетов с промышленными данными российских и зарубежных компаний. На взгляд оппонента более показательной является верификация модели путем сравнения результатов моделирования с данными, полученными другими исследователями. 3) В третьей главе при моделировании процесса фильтрации вязкопластичной жидкости правое граничное условие соответствует заданию пластового давления на бесконечном удалении от скважины. Остается неясным, в каких реальных масштабах практических задач можно принимать это допущение. 4) В работе приводятся решения соответствующих практических задач, однако отсутствуют данные о внедрении результатов исследования. 5) Цель работы «повышение качества моделирования задач подземной гидромеханики за счёт разработки комплексной методологии моделирования процессов тепломассопереноса» сформулирована не совсем конкретно. Что подразумевается «комплексностью» методологии, какие подходы конкретно она объединяет?

**4. Официального оппонента**, доктора физико-математических наук, профессора, академика РАН, заведующего лабораторией математического моделирования процессов фильтрации Института механики и машиностроения – обособленного структурного подразделения Федерального государственного бюджетного учреждения науки «Федеральный исследовательский центр «Казанский научный центр Российской академии наук» Никифорова Анатолия Ивановича. Отзыв положительный.

Имеются вопросы и замечания: 1) При моделировании парогравитационного дренажа соотношение тепловых потоков задается эмпирической зависимостью Эдмундса-Петерсона. Возможно ли в рамках предложенного интегрального подхода использовать другую корреляцию для соотношения тепловых потоков? 2) Моделирование фильтрации неньютоновской жидкости осуществляется в цилиндрической системе координат, выбор которой не до конца поясняется в работе. 3) В исследованиях процесса кольматирования техногенной трещины не отображено влияние размера дисперсных частиц на эффективность блокирования части трещины.

**5. Доктора физико-математических наук, профессора, старшего эксперта Общества с ограниченной ответственностью «РН-БашНИПИнефть» Байкова Виталия Анваровича.** Отзыв положительный.



Имеется замечание: в пятой главе присутствует валидация предложенного метода решения многомасштабных задач на основе сопоставления падения приёмымости после физико-химического воздействия с промысловыми данными по одному из месторождений Западной Сибири, однако не проведена верификация этого метода сопоставлением расчётов с данными, полученными с использованием специализированных гидродинамических симуляторов.

6. Доктора физико-математических наук, главного научного сотрудника Федерального государственного бюджетного учреждения науки Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта Российской академии наук **Баяк Ирины Олеговны**. Отзыв положительный. Вопросов и замечаний нет.

7. Доктора технических наук, профессора, заведующего кафедрой «Разработка и эксплуатация нефтяных и газовых месторождений» Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Тюменский индустриальный университет» **Грачева Сергея Ивановича**. Отзыв положительный.

Имеются вопросы и замечания: 1) Как известно, методология – это комплекс принципов и подходов исследовательской деятельности, на которые опирается ученый (соискатель) в ходе получения и разработки знаний в рамках, например, специальности «Теплофизика и теоретическая теплотехника». Отсюда следует, что термин «комплексная методология» является тавтологией (комплексный комплекс). Есть тавтология и в формулировке «Цели ...» - «... моделирования ... моделирования». 2) Одним из важных разделов современной теории разработки месторождений углеводородного сырья является методология решения задач теории фильтрации в 3D многофазной постановке (с различными модификациями). Ее развитию посвящены исследования, например, научной школы С.Н. Закирова (Закиров И.С., Закиров Э.С., Палатник Б.М. и др.). Для решения задач регулирования процессами разработки при различных воздействиях на продуктивные пласты ее последователями привлекались численные методы и методы теории оптимального управления. Общность поставленных задач привела эту группу ученых под общим руководством С.Н. Закирова к созданию собственной методологии их решения. Соискатель предлагает оригинальную методологию моделирования тепломассопереноса применительно к решению прикладных задач процесса добычи нефти. Но при изучении автореферата (разделы «Актуальность...» и «Задачи...») весьма сложно сделать заключение – в чем наиболее важная точка

приложения методологии и какова общность поставленных задач? Не способствует этому и то, что на защиту выносятся результаты исследований из диссертационной работы, соответствующие 4 пунктам паспорта научной специальности. 3) Как известно, в структуре методологии выделяют фазы, стадии или этапы выполнения работ и решения задач (последовательный метод или цикл развития). В диссертационной работе (первая глава) предлагается методология, состоящая из 8 положений (пунктов). Почему решение поставленных задач (главы 2-6) не требует очередности выполнения (и не выполнения) разработанных этапов. 4) В шестой главе необоснованно уделено внимание известным результатам исследований формирования трещин гидравлического разрыва пласта (С.А. Христианович, Ю.П. Желтов, Т. Перкинс и др.), которые не актуальны при решении седьмой задачи «Моделирование и численно-аналитическое исследование массопереноса в задачах кольматации техногенной трещины в нефтяных пластах» Поэтому считаю, что в анализируемом разделе не выявлена причинно-следственная связь между наличием между нагнетательной и добывающими скважинами зоны сверхпроводимости (тектонического и техногенного происхождения) и необходимостью применения квазиодномерного приближения для моделирования транспорта суспензии внутри прямоугольной трещины с целью прогнозирования длины ее закольматированной части. Известны результаты научной школы академика РАН Р.Ф. Ганиева, в рамках которой выполнено множество работ по управляемой кольматации под общим руководством д.т.н. Ю.С. Кузнецова (доктора техн. наук Аржанов А.Ф., Ишкаев Р.К., Кочетков Л.М. и др.). Признавая значительный вклад этих ученых в разработку технологий выравнивания профиля приемистости, замечу, что есть вопросы, которые не решены. Как известно, канал сверхпроводимости (естественного и техногенного происхождения) связывает зону воздействия нагнетательной скважины с зоной отбора добывающей скважины. При их одновременной работе между зонами существует граница раздела. На ней величина текущего давления равна значению начального пластового давления. Причем положение границы зависит от коэффициентов пьезопроводности пластовых флюидов. Каким образом, результаты, полученные с применением разработанного безразмерного комплекса, позволят определить объем изолирующего реагента, применение которого при физико-химическом воздействии на межскважинную зону обеспечит рентабельный период эксплуатации скважин при проектной величине обводненности?

8. Доктора технических наук, доцента, профессора кафедры теплофизики и информатики в металлургии Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина» **Лаврова Владислава Васильевича**. Отзыв положительный. Вопросов и замечаний нет.

9. Доктора технических наук, доцента, ведущего научного сотрудника лаборатории физико-химической механики Института механики Федерального государственного бюджетного учреждения науки «Удмуртский федеральный исследовательский центр Уральского отделения Российской академии наук» **Макарова Сергея Сергеевича**. Отзыв положительный.

Имеются вопросы и замечания: 1) Из автореферата неясно, какие соотношения или критериальные уравнения использованы в модели, изложенной в первой главе диссертации для расчета коэффициентов теплоотдачи в уравнениях (7), (10) и при решении задачи об эффективной продолжительности активного этапа CSS (рис. 4, стр. 15 автореферата). Насколько они справедливы для рассматриваемого процесса. 2) Во второй главе диссертации, согласно автореферату, решается дифференциальное уравнение теплопроводности (15). Автор указывает, что решение осуществляется с помощью явной конечно-разностной схемы. Из автореферата неясно, какие результаты по распределению температуры получены. Как изменялась температура по координатам и времени в процессе счета. Для какой геометрии выполнены расчеты и в каком интервале времени. Почему не использовалась неявная схема для записи конечных разностей? 3) В автореферате третья глава посвящена разработке комплексной методологии формирования критериального метода анализа моделей тепломассопереноса применительно к высоковязким флюидам и вязкопластичным жидкостям. Из автореферата не ясно, какой критерий этого метода включает параметры, определяющие теплоперенос и тепловое состояние веществ. 4) Из четвертой главы диссертации, описанной в автореферате, не ясно, проводилась качественная или количественная оценка неизотермичности при решении системы уравнений многофазной фильтрации на получаемые показатели вытеснения нефти смесью воды и газа.

10. Доктора физико-математических наук, старшего научного сотрудника, главного научного сотрудника лаборатории «Механики

жидкости, газа и систем гидроприводов» Института механики и сейсмостойкости сооружений имени М.Т. Уразбаева Академии наук Республики Узбекистана **Мирзоева Акмала Ахадовича**. Отзыв положительный. Вопросов и замечаний нет.

11. Доктора физико-математических наук, профессора, директора Тюменского филиала Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института теоретической и прикладной механики имени С. А. Христиановича Сибирского отделения Российской академии наук **Мусакаева Наиля Габсалямовича**. Отзыв положительный.

Имеются замечания: 1) При изучении пароциклического и парогравитационного дренажа автор на стр. 12 автореферата пишет, «применение сформулированных допущений позволяет свести моделирование к рассмотрению интегральных соотношений теплового баланса». Однако сами допущения не обозначены. 2) При моделировании процесса кольтирования техногенной трещины рассматриваются коэффициенты проницаемости, равные 0,1 Д (рис. 19) и 160 Д (рис. 20). Для таких значений коэффициента проницаемости использование линейного закона Дарси требует обоснования. Так же требует своего обоснования полученное в работе распределение концентрации частиц по длине трещины (рис. 19), которое показывает, что с удалением от скважины концентрация растет.

12. Доктора технических наук, заведующего кафедрой разработки и эксплуатации нефтяных и газовых месторождений Государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Альметьевский государственный нефтяной институт» **Насыбуллина Арслана Валерьевича**. Отзыв положительный. Вопросов и замечаний нет.

13. Доктора физико-математических наук, член-корреспондента Национальной академии наук Беларуси, главного научного сотрудника Института тепло- и массообмена имени А.В. Лыкова Национальной академии наук Беларуси **Павлюкевича Николая Владимировича** и кандидата физико-математических наук, старшего научного сотрудника Института тепло- и массообмена имени А.В. Лыкова Национальной академии наук Беларуси **Козначеева Ивана Алексеевича**. Отзыв положительный.

Имеются вопросы и замечания: 1) Смысл граничных условий (20)-(21) непонятен. Из рисунка 5 создается впечатление, что  $q_T(z)$  - это плотность потока на внешне границе нагнетательной скважины ( $r=r_w$ ). Уравнение (20) относится к границе рассматриваемой системы, лежащей в плоскости  $z=0$ .

Если единственным источником прогрева пласта считается нагнетательная скважина, то в уравнении (20) в правой части должен стоять 0. Уравнение (21) относится к плоскости  $\varphi=0$  ( $\varphi=2\pi$ ), проходящий через оси скважин, с учетом симметрии системы относительно плоскости, проходящей через оси скважин, в правой части уравнения (21) должен стоять 0. 2) В левой части уравнения (23) нет множителя с размерностью плотности, а в правой части он есть, возникает ошибка размерности. 3) В третьей главе рассматривается задача о закачке воды в нефтенасыщенный пласт через вертикальную нагнетательную скважину, указывается на радиальную симметрию задачи. Однако в уравнении (36) используется угол наклона пласта. Правомерность приближения радиальной симметрии в случае, когда пласт расположен под наклоном, нужно обосновать, ведь в этом случае есть выделенное направление, например, направление скорейшего спуска вдоль пласта. 4) На странице 31 автореферата указано, что в диссертации спланирован фильтрационный эксперимент по движению оторочки полимера в пористой среде для определения параметров адсорбции и удерживания полимера без разрушения образца горной породы. При этом на странице 33 указано, что в качестве исходных данных для определения параметров адсорбции-удерживания использовались лабораторные эксперименты по фильтрации оторочки полимера, проведенные в работе других авторов (Аль-Софи с соавторами). Тут требуется пояснение. 5) Замечание касается решения обратной задачи по фильтрации оторочки полимера в пористой среде. Как следует из автореферата, автор фактически решает прямую задачу по уравнениям (59)-(60) с использованием экспериментальных данных по фильтрации. Из этого решения прямой задачи определяются параметры адсорбции.

14. Доктора технических наук, доцента, руководитель проекта (Геология, Пермский регион и Республика Коми) Общества с ограниченной ответственностью «ЛУКОЙЛ-Инжиниринг» **Путилова Ивана Сергеевича**. Отзыв положительный.

Имеется замечание: недостаточное внимание уделено кинетике химических реакций в главе 5.

15. Доктора технических наук, менеджера Общества с ограниченной ответственностью «Тюменский нефтяной научный центр» Публичного акционерного общества «Нефтяная компания «Роснефть» **Салимова Олега Вячеславовича**. Отзыв положительный.

Имеются замечания: 1) По тексту автореферата остается не до конца понятным выбор моделей Стоуна I и II для расчета относительных фазовых проницаемостей при ВГВ. 2) В шестой главе при описании физико-математической модели кольматирования техногенной трещины, задача расчета блокирования трещины разбивается на две подзадачи: первую – транспорт суспензии по трещине, и вторую – собственно кольматацию трещины как скачок концентрации частиц, движущегося в обратном направлении. При этом не рассматривается процесс фильтрации суспензии через фильтрационную корку, которая по всей видимости должна образовываться. Кроме этого, в автореферате не пояснен параметр «длина трещины» в таблице 1, который не коррелирует с остальными параметрами длины.

16. Доктора технических наук, старшего эксперта Общества с ограниченной ответственностью «Тюменский нефтяной научный центр» Публичного акционерного общества «Нефтяная компания «Роснефть» **Степанова Сергея Викторовича**. Отзыв положительный.

Имеются замечания: 1) В автореферате имеются неоднозначные формулировки и опечатки. Например, автор пишет: «...степень неопределённости исходных данных, которая изначально имеется по любому объекту разработки, существенно повышается за счёт большого объёма обрабатываемой информации при составлении корреляционных зависимостей» - большой объем (качественной) информации, наоборот, должен способствовать уменьшению неопределенности. Другой пример – формула (23): размерность левой части не соответствует размерности правой части. Еще пример: применительно к рис.6 говорится о блок-схеме программного комплекса, хотя на самом деле дается блок-схема, иллюстрирующая программную реализацию разработанной физико-математической модели (очевидно, что блок-схема программного комплекса должна отражать взаимодействие программных модулей этого комплекса между собой, а не описание получения тех или иных величин с проверкой условий). 2) Эффективность решения задач, перечисленных в разделе «Практическая значимость» не достаточно аргументирована, в т.ч. с позиции поставленной цели (повышение качества моделирования). Известно, что для оценки качества моделирования можно использовать критерии качества, такие как: точность, экономичность, универсальность, адекватность – можно было бы использовать эти критерии для получения объективной картины по полученным результатам диссертационной работы. 3) Не понятно в чем

заключается новизна алгоритма для минимизации неопределенности моделирования водогазового воздействия на пласт – анализ функций относительной фазовой проницаемости для трехфазных систем встречается и у других авторов, например, в статьях SPE-81021, SPE-166138.

17. Кандидата физико-математических наук, доцента, исполняющего обязанности заведующего кафедрой физики и приборостроения Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Тюменский индустриальный университет» **Третьякова Петра Юрьевича**. Отзыв положительный.

Имеются замечания: 1) Из автореферата не ясен выбор в главе 5 экспериментов Аль-Софи для валидации разработанного метода определения параметров адсорбции, удерживания и недоступного порового объема. 2) В последней главе автореферата не исследовано влияние размера дисперсных частиц на эффективность блокирования части трещины автоГРП.

18. Доктора технических наук, профессора, директора по науке Публичного акционерного общества «Газпром нефть» **Хасанова Марса Магнаевича**. Отзыв положительный.

Имеется замечание: при моделировании процесса кольматирования техногенной трещины остается неясным влияние природы и размера дисперсных частиц на эффективность ее блокирования.

Выбор официальных оппонентов и ведущей организации обосновывается их высокой профессиональной квалификацией, наличием публикаций по проблематике, связанной с темой диссертации, компетенцией в вопросах, имеющих отношение к теме работы. Ведущая организация и оппоненты не имеют совместных проектов и публикаций с соискателем.

Диссертационный совет отмечает, что на основании выполненных соискателем исследований:

**разработаны:**

- физико-математическая модель тепломассопереноса при пароциклическом дренаже высоковязкой нефти;
- интегральная физико-математическая модель развития паровой камеры при парогравитационном дренаже на всех стадиях процесса;
- алгоритм интерпретации параметров адсорбции-удерживания и недоступного порового объема в изотермическом приближении из решения обратных задач фильтрации оторочки полимера через образец пористой среды;

- физико-математическая модель кольтирования техногенной трещины, учитывающая баланс закачиваемой воды и её оттока из трещины в пласт в виде краевого условия для определения давления на конце трещины;

**предложены:**

- метод анализа моделей тепломассопереноса высоковязких флюидов и вязкопластичных жидкостей, позволяющий ввести критическую скорость, при которой процесс вытеснения нефти еще является устойчивым, и установить, что в начале процесса фильтрации влиянием предельного градиента давления на скорость притока нефти к добывающей скважине можно пренебречь;

- метод определения параметров адсорбции, удерживания и недоступного порового объема в изотермическом приближении без разрушения образца пористой среды из экспериментов по фильтрации оторочки полимера;

- метод решения многомасштабной задачи тепломассопереноса при выравнивании фильтрационных потоков в слоисто-неоднородной пористой среде, в котором локальная задача заключается в отыскании распределения концентрации вблизи нагнетательной скважины, а внешняя – в расчете перераспределения потоков во всем пласте;

- безразмерный комплекс, характеризующий особенности массообмена трещины с пластом и определяющий возможность блокирования трещины с её конца или с некоторого удаления от него.

**Доказано, что:**

- при одном и том же объеме форма паровой камеры независимо от учета свободной конвекции пара незначительно влияет на процесс притока нефти к добывающей скважине;

- для процесса пароциклического дренажа время простоя скважины для прогрева скелета пористой среды определяется балансом тепловых потерь и выделяемой в результате конденсации пара теплоты,

- при пароциклическом и парогравитационном дренаже с фиксированным расходом нагнетаемого пара рост прогретой области ограничен достижением баланса подводимого и теряемого тепла;

- существует минимальный расход пара, при котором происходит формирование паровой камеры;

- в процессе парогравитационного дренажа весь пласт прогревается в случае, если закачиваемое тепло превысит максимальные тепловые потери, соответствующие началу взаимодействия тепловых полей;



- в начале процесса фильтрации влиянием предельного градиента давления на скорость притока нефти к добывающей скважине можно пренебречь;

- закачку осадко-гелеобразующего реагента можно рассматривать в рамках разделения многомасштабной задачи тепломассопереноса на составляющие, при котором локальная задача описывает распределение концентрации реагента вблизи нагнетательной скважины, а внешняя – перераспределение потоков во всем пласте;

- для высокопроницаемых пластов возможен режим, когда несущая фаза отфильтровывается в пласт в начале трещины, в то время как пластовый флюид притекает в трещину ближе к ее концу.

Теоретическая значимость исследования обоснована тем, что:

**получены** аналитические решения, позволившие установить существование критических расходов пара, необходимых для инициации процесса и начала интерференции паровых камер, на основе процедуры асимптотического анализа разработанной автором интегральной модели парогравитационного дренажа;

**получены** решения обратных задач по определению параметров адсорбции-удерживания и недоступного порового объема при фильтрации оторочки полимера через образец пористой среды, обеспечивающие оценку этих параметров без его разрушения;

**получены** аналитические и численные решения задачи кольматирования техногенных трещин, обеспечивающие возможность решать проблемы предотвращения прорыва воды в зону дренирования добывающих скважин.

**использованы** фундаментальные уравнения тепломассопереноса и механики многофазных сред применительно к задачам интенсификации притока флюида в пористой среде с учетом фазовых переходов; современные и апробированные численные и аналитические методы решения задач подземной гидромеханики;

Значимость диссертационного исследования для науки определяется следующим:

**разработана** модель пароциклического дренажа пористых сред, насыщенных высоковязкой нефтью, применимая для описания этого процесса на слабоизученных месторождениях или для оценки применимости данного процесса;

**разработана** физико-математическая модель проникновения реагента в слоисто-неоднородную пористую среду, позволившая установить существование оптимального объема закачанного реагента, при котором наблюдается максимальный эффект выравнивания скоростей фильтрации флюидов при минимальном снижении расхода;

**разработана** комплексная методология моделирования процессов тепломассопереноса в пористых средах;

**изучены** процессы конвективного переноса массы пара при пароциклическом дренаже и их влияние на процесс притока нефти к добывающей скважине.

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

**разработан** интегральный подход к описанию процессов тепломассопереноса при парогравитационном дренаже, позволяющий оптимизировать расстояние между скважинами для повышения объема извлекаемого флюида;

**сформулирована** комплексная методология, дающая возможность оценивать необходимость применения выбранных методов интенсификации притока нефти для пористых сред со сверхнизкой проницаемостью, насыщенных флюидами со сложной реологией;

**создан** алгоритм анализа процессов тепломассопереноса применительно к задачам вытеснения нефти при водогазовом воздействии, позволяющий прогнозировать эффективное соотношение воды и газа;

**предложен** метод решения многомасштабных задач тепломассопереноса в процессе выравнивания фильтрационных потоков за счет закачки реагента в пористую среду, позволяющий повысить эффективность малообъемных закачек физико-химических реагентов.

Оценка достоверности результатов исследования выявила:

**теория** основывается на использовании фундаментальных уравнений тепло- и массопереноса при аналитическом и численном описании процессов пароциклического и парогравитационного дренажей, устойчивости вытеснения высоковязкой нефти водой, фильтрации вязкопластичной жидкости, вытеснения нефти смесью воды и газа, адсорбции и удерживания реагента в пористой среде, выравнивания фильтрационных потоков в слоисто-неоднородной пористой среде и коагуляции техногенной трещины;

**идея** базируется на актуальных теоретических работах по решению прямых и обратных задач подземной гидромеханики и экспериментальных данных российских и зарубежных исследователей;

**установлено**, что валидация математических моделей интенсификации процесса извлечения флюида из насыщенной пористой среды с использованием данных натуральных и промысловых экспериментов показывает их удовлетворительную точность.

**Личный вклад** автора заключается в разработке комплексной методологии моделирования процессов теплопереноса в приложении к задачам подземной гидромеханики; формулировке математических методов и моделей эксплуатации месторождений с применением тепловых и физико-химических методов воздействия на насыщенную пористую среду в рамках общего подхода теплофизики и механики многофазных сред; а также в получении численных и аналитических решений прямых и обратных задач теплообмена в пористой среде. Автором написаны статьи по теме диссертационных исследований в тематические и профильные журналы.

В ходе заседания было высказано критическое замечание о том, что термин «комплексная методология» в названии диссертационной работы использован некорректно. Как известно, методология – это комплекс принципов и подходов исследовательской деятельности, на которые опирается ученый (соискатель) в ходе получения и разработки знаний. Поэтому слово «комплексная» в такой формулировке неуместно.

Соискатель Шевелёв А.П. ответил, что под «комплексностью» методологии подразумевается использование подходов теплофизики, механики многофазных систем, численных и аналитических методов решения и формулировка общих принципов моделирования в приложении к различным актуальным задачам подземной гидромеханики, связанных с интенсификацией притока нефти.

На заседании 20.06.2024 г. диссертационный совет принял решение: за научное достижение, связанное с разработкой физико-математических моделей пароциклического и парогравитационного дренажей, кольматации техногенной трещины; созданием методов анализа моделей теплопереноса высоковязких флюидов и вязкопластичных жидкостей, определения параметров адсорбции, удерживания и недоступного порового объёма в изотермическом приближении без разрушения образца пористой среды; решения многомасштабной задачи теплопереноса при выравнивании фильтрационных потоков в слоисто-неоднородной пористой

среде; алгоритма, позволяющего минимизировать неопределенность решения задачи о вытеснении нефти смесью воды и газа; формулировкой безразмерного комплекса характеризующего особенности массообмена трещины с пластом и определяющего возможность блокирования трещины с её конца или с некоторого удаления от него на основе комплексной методологии моделирования процессов тепломассопереноса в приложении к задачам подземной гидромеханики присудить Шевелёву Александру Павловичу ученую степень доктора физико-математических наук.

При проведении тайного голосования диссертационный совет в количестве 12 человек, из них 5 докторов физико-математических наук по профилю рассматриваемой диссертации, участвовавших в заседании, из 16 человек, входящих в состав совета, проголосовали: за – 12, против – 0, недействительных бюллетеней – 0.

Председатель

диссертационного совета

д.т.н., профессор



Ученый секретарь

диссертационного совета

к.ф.-м.н.

Валиуллин Рим Абдуллович

Хабилов Тимур Раильевич

20 июня 2024 г.