

УТВЕРЖДАЮ

Проректор
по научной работе, к.ф.-м.н.



Баган Виталий
Анатольевич

2023 г.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

федерального государственного автономного образовательного
учреждения высшего образования
«Московский физико-технический институт
(национальный исследовательский университет)»
(МФТИ, Физтех)

Диссертация «Быстрые расчётные модели сложной механики гидроразрыва и кислотной обработки пласта» выполнена на кафедре прикладной механики федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет)» Министерства науки и высшего образования Российской Федерации.

С 2019 по 2023 г. Пещеренко А. Б. являлась аспиранткой кафедры прикладной механики федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет)», трудовую деятельность не осуществляла.

В 2019 г. **Пещеренко Александра Борисовна** окончила федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет)» по направлению подготовки 03.04.01 Прикладные математика и физика.

Справка о сдаче кандидатских экзаменов выдана в 2023 г. федеральным государственным автономным образовательным учреждением высшего образования «Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет)».

Научный руководитель — кандидат физико-математических наук Чупраков Дмитрий Арефьевич. Основное место работы — ООО «Технологическая Компания Шлюмберже», Новосибирский Центр, инженер.

По итогам обсуждения диссертации «Быстрые расчётные модели сложной механики гидроразрыва и кислотной обработки пласта» **принято следующее заключение.**

Тема диссертации является актуальной

1. Для расчётов геометрии трещин гидравлического разрыва пласта (ГРП) в моделях разработки месторождений, при решении обратных задач, мониторинге в режиме реального времени, то есть для задач, где необходимо оценить геометрию сотен,

тысяч трещин за несколько минут с удовлетворительной точностью.

2. Для прогнозирования, планирования, интерпретации полевых данных при обработке трещиноватых низкопроницаемых карбонатных коллекторов раствором кислоты (кислотной ОПЗ) либо кислотном ГРП.
3. Для оценки рисков, сопряжённых с перепродавкой, и прогнозирования влияния дизайна ГРП на форму области перепродавки.
4. Для планирования ГРП в коллекторах со слабыми контрастами горизонтальных напряжений, где необходимо избежать распространения трещины ГРП в нежелательный слой (водоносный слой, газовая шапка).

Цели и задачи диссертации

Цель № 1: для разработки месторождений создать симулятор ГРП со временем расчёта порядка 1 мин на 1000 запусков и достоверными прогнозами размеров трещин. Построить, верифицировать и валидировать модель; оценить скорость расчёта; применить модель к описанию реальных случаев и модельных задач.

Цель № 2: добавить к модели распространения трещины ГРП (цель № 1) описание взаимодействия трещин ГРП через поле напряжений. Выбрать модель взаимодействия трещин; оценить влияние учёта взаимодействия трещин на скорость расчёта; сравнить результаты с существующими симуляторами; применить сопряжённую модель к практическим и модельным примерам.

Цель № 3: разработать вычислительно эффективную модель, которая учитывает как химические, так и физические процессы во время ГРП и ОПЗ в трещиноватых карбонатах. Выбрать метод представления среды с естественными трещинами; описать транспорт вязкого флюида; дополнить модель уравнением реакции кислоты с карбонатными породами; вывести уравнения модели; смоделировать добычу нефти с кислотной обработкой и без неё.

Цель № 4: при помощи численного моделирования выявить факторы, влияющие на успешность операции ГРП с перепродавкой. Выделить сценарии ГРП, которые представляют исследовательский интерес; провести подробные численные расчёты на мелкой сетке; сделать выводы о ключевых факторах, влияющих на ГРП с перепродавкой; выяснить, насколько результаты расчёта зависят от шага сетки.

Цель № 5: предложить метод гарантированного контроля роста трещины в высоту. Придумать концепцию изобретения; провести расчёты, указывающие на гарантированный «захват» трещины ГРП.

Основные результаты диссертации

1. Получены уравнения механики Лагранжа для трещины ГРП с тремя обобщёнными координатами.
2. Создан, верифицирован и валидирован быстрый симулятор ГРП со временем расчёта порядка 1 минуты на 1000 запусков и с учётом взаимодействия трещин.
3. Разработана, верифицирована и валидирована вычислительно эффективная численная модель, которая учитывает как химические, так и физические процессы во время кислотных ГРП и ОПЗ в низкопроницаемых трещиноватых карбонатных коллекторах, последующих стадий технологического отстоя и добычи.
4. На основе детальных численных расчётов на мелкой сетке установлено, что на успешность операции ГРП с перепродавкой влияет форма области перепродавки, которая может быть осесимметричной либо иметь форму «вязких пальцев». Последний вариант является более желательным. Основной фактор, влияющий на

геометрию области, — это соотношение вязкостей жидкости ГРП и перепродавки.

5. Предложен новый метод гарантированного контроля роста трещины ГРП в высоту путём бурения новой горизонтальной скважины. Проведены численные расчёты, показывающие эффективность этого метода.

Все *результаты диссертации получены лично соискателем* при научном руководстве кандидата физико-математических наук Чупракова Д. А.

Научная новизна работы

1. Впервые получена модель распространения трещины ГРП на основе уравнений механики Лагранжа с асимметричной по длине трещиной.
2. Реализована, верифицирована и валидирована новая полуаналитическая модель трещины ГРП, позволяющая проводить быстрые расчёты геометрии трещины.
3. Исследована при помощи новой модели зависимость роста трещины в высоту от контрастов коэффициента утечек в слоях породы.
4. Впервые создана и валидирована модель сопряжения механики активации естественных трещин с кислотным выеданием стенок во время ОПЗ.
5. С помощью модели удалось воспроизвести наблюдаемое в полевых условиях резкое падение дебитов скважин ввиду закрытия естественных трещин.
6. В результатах моделирования закачки жидкости в трещиноватый карбонатный коллектор удалось отразить падение забойного давления при начале нагнетания раствора кислоты.
7. Установлены тренды изменения формы области перепродавки при модификации различных параметров дизайна ГРП, полезные на практике.
8. Открыт новый способ гарантированной остановки роста трещины ГРП в высоту за счёт бурения параллельной скважины.

Практическая ценность

Быстрая полуаналитическая модель трещины облегчает симуляцию разработки месторождений и делает её более достоверной. На основе модели создан новый программный плагин в комплексе Petrel. На основе модели кислотных ОПЗ и ГРП создан облачный сервис для моделирования трещиноватого пласта. При помощи этого сервиса полевые инженеры смогут предсказать поведение забойного давления и дебитов скважин после кислотных ОПЗ и ГРП, что ранее не представлялось возможным. При исследовании перепродавки определены тренды влияния характеристик закачки на исход операции ГРП с перепродавкой. Знание этих трендов повышает осведомлённость инженера и даёт базу для принятия решений по выбору дизайна ГРП. Новый способ удержания роста трещины в высоту гарантирует результат, что подтверждается численными расчётами.

Обоснованность и достоверность результатов и выводов

Обоснованность и достоверность результатов обеспечена строгостью используемого математического аппарата и подтверждаются сравнением результатов вычислительных экспериментов с известными в литературе экспериментальными и расчётными данными.

Обоснованность выводов и рекомендаций подтверждена:

1. Корректностью применения апробированного в научной практике исследовательского и аналитического аппарата.
2. Сопоставлением результатов исследования с точными решениями и полевыми данными.
3. Численными расчётами полученных выводов и закономерностей, оценками их

точности.

4. Презентацией и обсуждением результатов исследования на международных и российских научных конференциях.
5. Публикациями результатов исследования в рецензируемых научных изданиях.

Основные материалы диссертации, опубликованные автором

Работы, индексируемые Scopus

1. Peshcherenko A., Chuprakov D. An ultrafast simulator for 3D propagation of a hydraulic fracture with rectangular shape // Engineering Fracture Mechanics. 2021. № 243. С. 107512. <https://doi.org/10.1016/j.engfracmech.2020.107512>.
2. Peshcherenko A., Bekerev I., Chuprakov D., Abdrazakov D. Fast-running model for high-volume hydraulic fracturing // Journal of Petroleum Science and Engineering. 2022. № 213. С. 110430. <https://doi.org/10.1016/j.petrol.2022.110430>.

Патент

1. Чупраков Д., Пещеренко А. Способ гидроразрыва пласта// Номер свидетельства RU 2772626, зарегистрирован 25.05.2022 г.

Личный вклад соискателя в работах с соавторами заключается в следующем:

[1] — проведение аналитических выкладок для вывода расчётных формул, разработка программного кода для расчёта геометрии трещины, верификация и валидация результатов расчёта, расчёты для примеров применения модели в работе, оформление результатов расчёта для публикации, написание части текста публикации.

[2] — анализ результатов расчётов, оформление результатов расчёта для публикации, написание части текста публикации.

Патент — модификация аналитического решения для поля напряжений вокруг ствола скважины для учёта давления на скважине. Проведение расчётов, оформление их результатов, написание части текста документов заявки на патент.

Прочие публикации

1. Peshcherenko A., Anisimov M., Chuprakov D. «Effective Modeling of Stimulation and Production Decline From Tight Naturally Fractured Carbonate Reservoirs» // SPE Reservoir Characterisation and Simulation Conference and Exhibition, 2023.
2. Chuprakov D.; Belyakova L.; Glaznev I.; Peshcherenko A. «High-Resolution and Multimaterial Fracture Productivity Calculator for the Successful Design of Channel Fracturing Jobs». // SPE Russian Petroleum Technology Conference, 2021.
3. Peshcherenko A.; Chuprakov D. «The Lagrangian Mechanics of Two-Dimensional Asymmetric Hydraulic Fracture Propagation». // 54th U.S. Rock Mechanics / Geomechanics Symposium, 2020.
4. Peshcherenko A.; Chuprakov D. «Ultrafast simulations of asymmetric fracture growth in length and height using Lagrangian mechanics». // SPE Symposium: Hydraulic Fracturing in Russia. Experience and Prospects, 2020.

Доклады на научных конференциях и семинарах

1. 65-я Всероссийская научная конференция МФТИ (Москва, 2023).
2. Научно-исследовательский семинар кафедры газовой и волновой динамики МГУ (Москва, 2023).
3. Society of Petroleum Engineers (SPE) Reservoir Characterisation and Simulation

- Conference and Exhibition [Конференция и выставка Общества инженеров-нефтяников (SPE) по характеризации коллекторов и моделированию] (Абу-Даби, ОАЭ, 2023, заочное участие).
4. Научный семинар Института динамики геосфер РАН (Москва, 2022).
 5. International Geomechanics Symposium (IGS) [Международный симпозиум по геомеханике (IGS)] (Абу-Даби, ОАЭ, 2022, заочное участие).
 6. 3rd International Conference on Coupled Processes in Fractured Geological Media: Observation, Modeling, and Application (CouFrac) [3-я Международная конференция по связанным процессам в трещиноватых геологических средах: наблюдение, моделирование и применение (CouFrac)] (Беркли, США, 2022, виртуальное участие).
 7. Совместный семинар «Газпромнефть НТЦ» и НГУ «Моделирование в нефтяном инжиниринге» (онлайн-формат, 2022).
 8. American Rock Mechanics Association (ARMA) Hydraulic Fracturing Community Seminar [Семинар сообщества по гидроразрыву пласта Американской ассоциации механиков горных пород (ARMA)] (онлайн-формат, 2022).
 9. 64-я Всероссийская научная конференция МФТИ (онлайн-формат, 2021).
 10. Society of Petroleum Engineers (SPE) Virtual Geomechanics Workshop [Виртуальный семинар по геомеханике Общества инженеров-нефтяников (SPE)] (онлайн-формат, 2021).
 11. Society of Petroleum Engineers (SPE) Russian Petroleum Technology Conference [Российская техническая нефтегазовая конференция Общества инженеров-нефтяников (SPE)] (онлайн-формат, 2021).
 12. 54th U.S. Rock Mechanics/Geomechanics Symposium [54-й Симпозиум по механике горных пород/геомеханике в США] (Голден, США, 2020; виртуальное участие).
 13. SPE Symposium: Hydraulic Fracturing in Russia. Experience and Prospects [Онлайн-Симпозиум Общества инженеров-нефтяников (SPE): ГРП в России. Опыт и перспективы] (онлайн-формат, 2020).
 14. Внутренние конференции ООО «Технологическая Компания Шлюмберже» (Москва, 2019–2023).

Содержание диссертации соответствует паспорту специальности 1.6.9. «Геофизика», в частности, пунктам 5, 8, 12, 14, 16, 17:

5. Структура, физические процессы и физические свойства вещества в коре и мантии Земли. Изучение структуры и динамики земной коры в рамках упругих, упругопластических, упруго-хрупких, вязкоупругих и т. п. моделей.

8. Взаимодействие геосфер, деформационных и геофизических полей. Геофизические проявления напряженно-деформированного состояния недр и оценка напряженно-деформированного состояния оболочек Земли по геофизическим данным. Временная эволюция геофизических характеристик земных недр. Изучение процессов взаимодействия геофизических полей разной природы в земных недрах и их влияние на физические характеристики геологического вещества.

12. Математическое моделирование и мониторинг геодинамических процессов различных пространственных и временных масштабов. Моделирование блочно-иерархических, самоподобных, пористых, флюидонасыщенных сред. Математическое моделирование эффективных физических свойств горных пород. Развитие методов теории эффективных сред для определения эффективных физических свойств горных пород. Экспериментальные и

теоретические исследования процедур осреднения геофизических полей и физических характеристик таких сред.

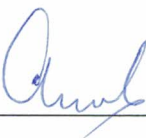
14. Математические и численные исследования в теории прямых и обратных задач геофизики (сеймики, геоэлектрики, гравиметрии, магнитометрии, геотермики, ядерной геофизики, петрофизики, дистанционных зондирований Земли), включая геофизические методы разведки, скважинную и инженерную геофизику. Разработка алгоритмов решения прямых и обратных задач геофизики, методов аппроксимации геофизических полей, цифровой фильтрации, нейронных сетей и машинного обучения для повышения разрешающей способности методов и подавления помех, построения изображений. Создание соответствующих компьютерных технологий, в том числе для суперкомпьютеров и графических процессоров, и их применение в геолого-геофизической практике при достаточной математической новизне.

16. Методы обработки и интерпретации результатов измерений геофизических полей.

17. Компьютерные системы обработки, численной инверсии и комплексной интерпретации геолого-геофизических данных, включая ГИС-технологии.

Диссертация «Быстрые расчётные модели сложной механики гидроразрыва и кислотной обработки пласта» **Пещеренко Александры Борисовны** рекомендуется к защите на соискание учёной степени кандидата физико-математических наук по специальности **1.6.9. «Геофизика»**.

Заключение принято на заседании кафедры прикладной механики МФТИ, Физтех. Присутствовало на заседании 28 человек. Результаты голосования: «за» — 28 чел., «против» — нет, «воздержались» — нет, протокол № 3 от 11 апреля 2023 года.



Негодяев Сергей Серафимович
кандидат технических наук,
заведующий кафедрой
прикладной механики