



Утверждаю:

Вице-президент по науке Сколковского института науки и технологий,

доктор физико-математических наук

Кабатянский Григорий Анатольевич

«26» июля 2023 г.

Отзыв ведущей организации

Автономной некоммерческой образовательной организации высшего образования
«Сколковский институт науки и технологий» (Сколтех) на диссертацию

Пещеренко Александры Борисовны

«Быстрые расчётные модели сложной механики гидроразрыва и кислотной
обработки пласта», представленную в диссертационный совет 24.1.059.01

Федерального государственного бюджетного учреждения науки

Институт динамики геосфер имени академика М.А. Садовского Российской академии наук
(ИДГ РАН) на соискание учёной степени кандидата физико-математических наук

по специальности 1.6.9 — Геофизика»

Актуальность темы диссертации

Диссертационная работа Пещеренко А. Б. посвящена созданию быстрых, но обладающих достаточной точностью моделей гидроразрыва пласта (ГРП), как проппантного, так и кислотного, а также кислотной обработки призабойной зоны пласта (ОПЗ). Тема работы является актуальной: при разработке высокоточных и сложных решений для моделирования ГРП и ОПЗ исследователи в нефтегазовой отрасли меньше концентрировались на задачах, которые требуют расчёта множества дизайнов за ограниченное время. Сейчас ГРП, особенно на новых коллекторах с трудноизвлекаемыми запасами, превратился из опционального способа интенсификации добычи углеводородов в рутинную операцию, которую следует учитывать уже на этапе планирования разработки месторождений с, например, многостадийными ГРП на горизонтальных скважинах. Это требует сотни и тысячи расчётов распространения трещины за короткий (минуты) срок. Не менее рутинными являются операции кислотного ГРП и ОПЗ в трещиноватых карбонатных коллекторах. В этом случае нет моделей, которые объединяли бы физические и химические

процессы и помогали бы моделировать отклик коллектора с естественными трещинами на закачку кислоты или неактивной жидкости. Модели такого рода необходимы для описания специфических явлений при кислотных работах в полях, где есть трещиноватые карбонатные коллекторы, что ещё раз подчёркивает актуальность работы А. Б. Пещеренко.

Цели и задачи диссертационной работы

Диссертант сформулировал следующие цели:

- 1) создать новый симулятор ГРП со временем расчёта геометрии трещины и взаимодействия трещин через поле напряжений порядка сотых долей секунды; при этом результаты моделирования должны отклоняться от таковых для коммерческих симуляторов не более чем на 20 %;
- 2) для сильно трещиноватых низкопроницаемых карбонатных коллекторов разработать вычислительно эффективную модель химических и механических процессов при кислотном ОПЗ и ГРП, которая воспроизводила бы полевые наблюдения в таких коллекторах;
- 3) исследовать результаты ГРП с перепродавкой при помощи симуляции с высоким разрешением по пространству и времени и определить, какие параметры наиболее сильно влияют на форму области, обеднённой проппантом;
- 4) предложить способ гарантированного контроля распространения трещины ГРП в высоту.

Задачи разделов 1–3 связаны с созданием новых моделей. Новые модели необходимо разработать, верифицировать и валидировать, исследовать скорость и достоверность их расчётов. Задачи раздела 4 состоят в выборе основного сценария и параметров, которые могут повлиять на геометрию области перепродавки. Для раздела 5 необходимо обосновать результативность предложенного способа гидроразрыва пласта.

Структура и содержание работы

Диссертация состоит из введения, пяти разделов, заключения, списка работ, опубликованных по теме диссертации, списка литературы из 170 наименований, трёх приложений. Общий объём диссертации — 181 страница, включая 80 рисунков и 21 таблицу.

Раздел 1 показывает построение модели трещины с асимметричной длиной крыльев. Асимметрия возникает из-за внешнего неоднородного поля минимальных горизонтальных напряжений. Автор использовал подход статьи Biot et al. (1986), который заключается в использовании лагранжева формализма применительно к задаче распространения трещины ГРП, что сводит задачу расчёта распространения трещины к нескольким ОДУ, численное решение которых занимает около 0.07 секунд на 1 расчёт. Модель удалось верифицировать сравнением с точными решениями в предельных случаях M , \tilde{M} , K , \tilde{K} для трещины PKN, при этом наблюдается полное совпадение геометрии трещин. Параметрические исследования влияния различных параметров (модель Юнга, вязкость жидкости, коэффициент утечек по Картеру) на асимметрию крыльев трещины завершают этот раздел. Автор сделал вывод о том, что для применения этой модели к реальным задачам пришлось бы записывать не менее 2 дополнительных ОДУ на высоту трещины над и под точкой её инициации (в модели диссертационной работы высота трещины считалась постоянной), что породило бы большие трудности в аналитических выкладках из-за громоздкости выражений.

Раздел 2 продолжает тему раздела 1 и также посвящён созданию «быстрой» модели ГРП с принципиально другим подходом. Геометрия этой трещины упрощена до прямоугольного параллелепипеда с эффективной шириной, асимметричной относительно точки инициации высотой и асимметричной длиной крыльев. Алгоритм расчёта основан на итерационном цикле, в котором проверяется условие на баланс коэффициента интенсивности напряжений (КИН) и трещиностойкости породы $K_I = K_{IC}$. При расчёте K_I для любого из четырёх кончиков используется модель утечек по Картеру, течение вязкой ньютоновской жидкости в приближении теории смазки, локальное соотношение упругости. Если $K_I > K_{IC}$ для какого-то из четырёх кончиков трещины, кончику даётся небольшое приращение, после которого K_I пересчитывается, и это повторяется на каждом шаге по времени, пока КИН у какого-то кончика больше трещиностойкости; в противном случае совершается переход на следующий шаг по времени. Один расчёт занимает около 0.08 секунд. В модели реализовано взаимодействие трещин через поле напряжений. Приведены результаты верификации и валидации модели, при этом обнаружено, что прогноз роста трещины в высоту у новой модели в сложных геомеханических условиях близок к прогнозу коммерческой PL3D-модели. Раздел 2 содержит множество результатов моделирования как с учётом

взаимодействия трещин (особенно важное при продольном распространении трещин ГРП), так и без него.

В разделе 3 диссертант описывает модель распространения химически реактивной жидкости в трещиноватом карбонатном пласте с плотной сетью естественных трещин с образованием магистральной трещины ГРП или без неё. Для вычислительно эффективных расчетов задачи разработана модель эффективной среды. Для этого естественные трещины в пласте разделяются на семейства с одинаковыми свойствами внутри семейства. Затем при помощи масштабирования делается переход к эффективной трещиноватой среде, для которой записывается нелинейное анизотропное уравнение диффузии давления и уравнение транспорта кислоты в эффективной среде, а также уравнение, которое описывает разъедание стенок естественных и магистральной трещин. Численное решение этой сопряжённой задачи на двумерной сетке сравнительно быстрое и занимает около 10 секунд. Симуляции воспроизводят полевые наблюдения в трещиноватых карбонатных коллекторах, опубликованные прежде без модельного обоснования: 1) падение забойного давления при поступлении на забой раствора кислоты и 2) быстрое снижение дебита скважины в плотном трещиноватом коллекторе при сбросе давления. Оба явления зависят и от геомеханических свойств трещиноватого пласта, и от условий, в которых протекала химическая реакция. В разделе 3, как и ранее, после валидации и верификации приводится обширное исследование отклика пласта в рамках новой модели на изменение различных параметров закачки и самого пласта.

Раздел 4 отвечает на вопрос о том, от чего зависит геометрия области перепродавки при ГРП, когда после продавки проппанта в призабойную область трещины проникает небольшой объём «чистой» жидкости. Обсуждается, когда перепродавка может негативно сказаться на последующей добыче и когда она не окажет существенного влияния на дебит добычи. В отличие от разделов 1–3, диссертант не создавал новую модель для описания перепродавки, а пользовался коммерческим симулятором распространения трещины ГРП и транспорта гидросмеси в трещине. Были проведены расчёты удельной концентрации проппанта для объёмов перепродавки от 0 до 5 м³ для «основного» сценария и ряда его вариаций, где менялся какой-то из параметров закачки. Пространственное разрешение численного симулятора было высоким (до 257 на 257 узлов сетки), и каждый такой расчёт

занимал несколько часов. На основе этих симуляций был сделан вывод, что наиболее сильно на форму области перепродавки влияет контраст вязкостей жидкости перепродавки и гидросмеси в трещине, а, например, расход закачки при перепродавке, фракция проппанта имеют второстепенное значение. Контраст вязкостей регулирует степень проявления неустойчивости Саффмана — Тейлора, которая приводит к образованию длинных каналов внутри трещины и является более благоприятной для последующей добычи, чем противоположный сценарий — поршневое вытеснение гидросмеси жидкостью перепродавки.

Наконец, **раздел 5** содержит описание запатентованного полезного изобретения из области нефтегазодобычи. Решается проблема ограничения распространения трещины ГРП в высоту. Предложенный метод контроля роста трещины в нежелательный пропласток состоит в бурении скважины у границы продуктивного пласта параллельно скважине ГРП. При этом поле пороупругих напряжений в пласте от двух скважин создаст условия, при которых кончик трещины будет «захвачен» вспомогательной скважиной, что предотвратит его дальнейший рост в высоту. Приводятся геомеханические расчёты поля напряжений, подтверждающие возможность такого сценария.

Научная новизна работы

Для моделирования закачки и обработки призабойной области пласта предложены новые вычислительно быстрые модели, тогда как прежде для расчетов задач с такой сложностью использовались численные модели с более длительным временем расчета. Кроме того, В разделе 1 известная модель распространения трещины в статье Biot et al. (1986) получает дальнейшее развитие, её уравнения выводятся с бóльшим количеством обобщённых координат для асимметричной по длине трещины. Модель раздела 2 позволила исследовать распространение трещины ГРП в неоднородном распределении коэффициента утечек вдоль вертикальной координаты. Модель раздела 3 сопрягает химические и механические процессы, происходящие при кислотных ГРП и ОПЗ в трещиноватых карбонатных коллекторах, давая возможность воспроизводить характерные для таких коллекторов эффекты (падение забойного давления при поступлении на забой раствора кислоты и быстрое снижение дебита скважины в плотном трещиноватом коллекторе при сбросе давления), связанные и с геомеханикой, и с химией реакции карбонатной породы с

закачиваемой кислотой. Раздел 4 впервые, согласно исследованию литературы, проведённого автором, исследует перепродавку в распространяющейся трещине ГРП, охватывая широкий спектр параметров расписания закачки: вязкость жидкости ГРП, вязкость жидкости перепродавки, расход закачки при перепродавке, использование волоконных добавок и различных фракций проппанта. Раздел 5 содержит описание новой технологии ГРП, при которой останавливается рост трещины в нежелательные пропластки.

Практическая значимость работы

Практическая значимость работы не вызывает сомнений. Многие из сделанных моделей внедрены в продукты компании Шлюмберже. В частности, модель раздела 2 была встроена в коммерческий симулятор разработки месторождений на основе Petrel, а также использована для анализа пригодности участков пласта для ГРП на основе статистической модели; модель раздела 3 позволяет быстро (за 10 секунд) оценить исход ГРП и ОПЗ в сложных геомеханических условиях коллектора с естественной трещиноватостью. Раздел 4 завершает сводка рекомендаций для инженеров ГРП относительно того, как изменение тех или иных параметров дизайна ГРП повлияет на исход ГРП с перепродавкой, а раздел 5 описывает полезное изобретение, которое может быть использовано на практике.

По работе имеются следующие замечания

- 1) В литературном обзоре при обсуждении моделей трещины PKN и P3D можно было упомянуть их “enhanced” версии, предложенные Е. Донцовым и Э. Пирсом. В данных версиях в явном виде учитывается асимптотика раскрытия вблизи кончика трещины и используется нелокальное уравнение упругости.
 - Dontsov E. V., Peirce A. P. An enhanced pseudo-3D model for hydraulic fracturing accounting for viscous height growth, non-local elasticity, and lateral toughness //Engineering Fracture Mechanics. – 2015. – Т. 142. – С. 116-139.
 - Dontsov E. V., Peirce A. P. Comparison of toughness propagation criteria for blade-like and pseudo-3D hydraulic fractures //Engineering Fracture Mechanics. – 2016. – Т. 160. – С. 238-247.
-

- 2) Желательно было бы сформулировать/обсудить границы применимости быстрой модели МГРП, сформулированной в главе 2, поскольку она содержит большое количество упрощающих предположений;
- 3) Модель кислотной обработки трещиноватого карбонатного коллектора не учитывает образование червоточин при проникновении кислоты в породу, а также кислота никак не влияет на параметры шероховатости стенок трещины; необходимо оценить влияние этих эффектов на геометрию трещины и ее остаточную проводимость;
- 4) В классических моделях переноса кислоты при кислотной обработке пласта в качестве параметра, характеризующего содержание кислоты в элементарном объеме закачиваемой жидкости, используется массовая концентрация (доля массы кислоты в единице массы раствора). Для правильной формулировки закона сохранения массы необходимо использовать объемную долю кислоты для вычисления массы кислоты, находящейся в элементарном объеме смеси; какой параметр использован в данной работе? Если это объемная доля, то проведен ли пересчет замыкающих соотношений модели кислотной обработки, которые сформулированы в стандартных моделях относительно массовой концентрации кислоты?
- 5) По Главе 4 о моделировании перепродавки есть концептуальное замечание: а нужно ли моделировать совместное распространение трещины ГРП и перепродавку при условии, что перепродавка выполняется с помощью исчезающе малого объема жидкости по сравнению с объемом трещины? Перепродавка выполняется на завершающей стадии, когда трещина уже создана, заполнена проппантом и не растет.
- 6) В модели не учитывается наличие лага в кончике трещины. На основе каких предположений им можно пренебречь?
- 7) В работе не учитываются утечки жидкости в пласт через стенки трещины (стр.98). На самом деле поступление кислоты в коллектор должно привести к растворению стенок пор и отразится на его проницаемости и эффективных механических свойствах.
- 8) В работе главные напряжения приняты постоянными (стр.96). На самом деле начальные напряжения состояние (*in situ*) складывается из бокового отпора, возникающего под действием сил собственного веса, и тектонических напряжений. Если тектонические горизонтальные напряжения можно задать неизменными, то

боковой отпор согласно решения Итона зависит от порового давления и коэффициента Пуассона коллектора и поэтому будет меняться в процессе кислотного гидроразрыва.4

- 9) На стр.148 приводится выражение для эффективного коэффициента Био. В тоже время при рассмотрении напряженно-деформированного состояния вокруг скважины (стр.144) эффективные напряжения заданы по Терцаги.
- 10) Формула 16, стр. 10: в коэффициенте Картера в качестве давления на стенке трещины обычно используется обжимающее напряжение.
- 11) После прочтения главы 1 остается непонятным в каком виде необходимо задавать зависимость раскрытия от безразмерной координаты (является свободным «параметром»). Зачастую при моделировании роста трещины решение находится не в конкретном предельном случае, а может лежать на траектории, идущей от одного предельного решения к другому или находиться в переходной зоне. Таким образом, профиль раскрытия нельзя задавать единым в общем случае, и его форма должна зависеть от времени. Например, в работе Dontsov E. V. Analysis of a constant height hydraulic fracture //Mechanics of Hydraulic Fracturing: Experiment, Model, and Monitoring. – 2022. – С. 127-139 предложен приближенный вид раскрытия трещины, являющийся продолжением асимптотики вблизи кончика. Данный профиль, возможно, можно использовать совместно с методикой, разработанной в главе. Также можно отметить, что построенное в данной работе приближенное решение для PKN трещины можно рассчитать за очень короткое время путем решения дифференциального уравнения, представляющего глобальный баланс жидкости.
- 12) Также, в связи с проблемой с профилем раскрытия точность результатов из раздела 1.4.3. остается под вопросом, так как выбран эллиптический профиль по умолчанию. Существует ли точное решение задачи, рассмотренной в этом разделе. Можно ли ее решить при помощи Planar3D подхода? Или же решение можно найти только с помощью построенной методики.
- 13) В разделе 2 проводится сравнение предельных решений для всех типов эффективно одномерных трещин с решениями, полученными при помощи предлагаемого подхода. В каких-то случаях модель очень хорошо воспроизводит решение, в каких-то точность очень плохая. Можно ли предположить на основе предпосылок модели,

что в том или ином случае, например, при доминировании определённого механизма диссипации энергии или баланса жидкости, упрощенное решение будет работать не точно.

Общая оценка

Указанные замечания не снижают общей оценки диссертационной работы в целом и не влияют на научную и практическую значимость работы.

Таким образом, диссертационная работа Пещеренко Александры Борисовны «Быстрые расчётные модели сложной механики гидроразрыва и кислотной обработки пласта» является законченной научно-квалификационной работой. Диссертационная работа Пещеренко А. Б. удовлетворяет всем требованиям «Положения о присуждении учёных степеней», утверждённого Постановлением Правительства РФ № 842 от 24 сентября 2013 года, а её автор, Пещеренко А. Б., заслуживает присуждения искомой учёной степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.6.9. — «Геофизика».

Отзыв составлен профессором, директором проектного центра по энергопереходу Сколковского института науки и технологий, доктором физико-математических наук Осипцовым Андреем Александровичем.

Отзыв обсуждён и одобрен на семинаре лаборатории моделирования многофазных систем проектного центра по энергопереходу Сколтеха 20 июля 2023 г.

Я, Осипцов Андрей Александрович, даю согласие на обработку моих персональных данных и их включение в документы, связанные с работой диссертационного совета.

Д.ф.-м.н.


26.07.2023

А. А. Осипцов

Подпись А. А. Осипцова удостоверяю (сотрудник отдела кадров)

РУКОВОДИТЕЛЬ ОТДЕЛА
КАДРОВОГО АДМИНИСТРИРОВАНИЯ
Гук О.С.

