

Отзыв

на автореферат

Пещеренко Александры Борисовны

«Быстрые расчётные модели сложной механики гидроразрыва и кислотной обработки пласта»,
представленной на соискание учёной степени кандидата физико-математических наук
по специальности 1.6.9. — «Геофизика»

Научно-квалификационная работа (диссертация) А. Б. Пещеренко состоит из 5 разделов и посвящена моделированию гидравлического разрыва пласта (ГРП) и процесса его кислотной обработки.

В Разделах 1 и 2 предложены и реализованы два подхода для создания быстрых симуляторов ГРП в слоистой среде, порядка минуты на 1000 сценариев трещин. Эти результаты качественно меняют ситуацию, например, при планировании разработки месторождений, т.к. появляется возможность использовать такого рода моделирование в современной нефтегазовой индустрии для расчёта многостадийных ГРП. В отличие от широко распространённых численных моделей ГРП (в первую очередь, PL3D, затем — менее универсальная P3D), требующих слишком много времени на необходимые расчёты, предложенные новые численные алгоритмы позволяют на порядки быстрее получать ответ с вполне приемлемой точностью, поскольку учитывают 3D природу роста трещины и пригодную для практики сложность резервуара. Также новые быстрые симуляторы позволяют подходить к проблеме интерпретации в реальном времени геометрии трещины ГРП по данным распределённых измерений (оптоволоконные датчики, например) на математически строгом уровне формулировки и решения обратных задач. Безусловно, это свидетельствует о высокой актуальности результатов исследований, полученных автором.

Раздел 1 содержит результаты создания вычислительно эффективной модели распространения трещины ГРП в пласте, в основе которого лежит запись уравнений механики Лагранжа для трещины ГРП, впервые выполненная М. Био и др. в 1976 г. Такая формулировка позволяет сводить задачу к решению нескольких ОДУ, что было использовано автором для написания быстрого алгоритма моделирования роста трещины. Более того, автором проведено развитие модели Био: от рассмотрения системы с 2 обобщёнными координатами — раскрытием трещины и длиной — осуществлен переход к описанию в рамках того же подхода трещины с различными длинами крыльев и переменной шириной, что описывается при помощи трёх обобщённых координат. Такая модификация исходных формул соответствует 3D природе роста трещины и создаёт научную новизну построений раздела 1 диссертации. Достоверность результатов и работы алгоритма проверена путем сравнения с некоторыми точными аналитическими решениями для предельных случаев распространения трещины ГРП.

Раздел 2 посвящён другому подходу для получения быстрой симуляции распространения трещины ГРП в пласте — на основе полуаналитической модели распространения трещины ГРП в форме тонкого прямоугольного параллелепипеда. Модель рассчитана на многократные запуски и может предсказывать результат взаимодействия трещин через поле напряжений, которое становится важным при проектировании многостадийных ГРП

на горизонтальных скважинах. Численный алгоритм использует итерации при вычислении коэффициента интенсивности напряжений на кончиках трещины, для условий согласования в модели ее распространения. При этом трещина может быть асимметрична по длине и по высоте, что соответствует требованиям реальных полевых задач. Можно отметить, что реализованный в модели учет контраста коэффициента утечек по слоям, позволил автору исследовать влияние контраста коэффициента Картера на распространение трещины в высоту (аналогов результатов таких исследований в литературе не найдено). Достоверность моделирования по предложенному и реализованному подходу подтверждается сравнением с аналитическими решениями в предельных случаях и с рядом решений, полученных с помощью коммерческих симуляторов ГРП.

Исследования **раздела 3** нацелены на создание сопряжённой физико-химической модели стимуляции трещиноватых карбонатных коллекторов с использованием раствора кислоты. На данный момент моделей, которые объединяют геомеханику разрушения, раскрытия и закрытия естественных трещин, и химические реакции в коллекторе, в литературе не представлено, и описать ряд специфичных для карбонатов явлений при помощи моделирования очень сложно. Автор предпринял попытку приблизиться к этому, используя вычислительно быструю модель эффективной среды для описания трещиноватого коллектора, которая сопрягается с моделью кислотной обработки. Сравнение с полевыми данными для кислотной обработки и добычи из трещиноватого пласта показывает качественное сходство результатов моделирования и полевых наблюдений: падение давления при начале закачки кислоты и резкое снижение дебитов в начале добычи из сильно трещиноватого коллектора.

Явление перепродавки и его последствия — тема **раздела 4** и многих дебатов о том, всегда ли перепродавка вредна для добычи нефти или газа. Автор использует сторонний верифицированный и валидированный коммерческий симулятор P3D со сложной подмоделью транспорта многофазной смеси (флюида и проппанта) в трещине для изучения приперфорационной области трещины с перепродавкой. Рассмотрено семь вычислительных экспериментов, в которых, изменяя параметры жидкости ГРП и проппанта, проводится анализ изменения области, подверженной перепродавке. Показано, что ключевое влияние на результат оказывает величина контраста вязкостей гидросмеси в трещине и жидкости перепродавки. В работе приводятся практически полезные зависимости формы области перепродавки (неустойчивость Саффмана — Тейлора или поршневое вытеснение) от различных параметров дизайна, цель которых — облегчить процесс принятия решений в инженерной практике.


Раздел 5 — описание изобретённой и запатентованной технологии контроля роста трещины ГРП в высоту путём бурения вспомогательной горизонтальной скважины. Так как скважины влияют на поле напряжений вокруг себя, поле напряжений от вспомогательной скважины будет «притягивать» кончик трещины и не даст ему распространиться в нежелательные пропластки. Геомеханические расчёты раздела на основе классических соображений механики пороупругой среды показывают границы применимости этого метода.

Подводя итоги, можно отметить следующие положительные стороны работы — большой объём исследований, широкий спектр тем, связанных с ГРП, несомненная практическая значимость исследований всех разделов, а также проведение автором верификации и валидации новых моделей во вполне достаточном объёме. Критике можно

подвергнуть некоторую мозаичность представленных результатов: разделы 1 и 2 посвящены исследованию, по сути, одной и той же задачи, в то время как разделы 3, 4 и 5 имеют не пересекающиеся с первыми двумя и друг с другом темы. И это могло представлять собой серьезный недостаток, если бы не то обстоятельство, что в каждом разделе автором получены законченные, практически значимые новые результаты.

Отмеченные замечания не снижают научную и практическую значимость результатов Пещеренко Александры Борисовны, представленных в диссертационной работе на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.6.9. — «Геофизика», которая является законченным оригинальным исследованием и соответствует требованиям Положения о присуждении учёных степеней ВАК.

Даю согласие на обработку своих персональных данных и включение их в документы, связанные с работой диссертационного совета.

[Учёная степень, учёное звание, должность, организация]	К.ф.-м.н., старший научный сотрудник, ФГБУН Институт гидродинамики им. М.А. Лаврентьева СО РАН  /Байкин А. Н.
	«04» сентября 2023 г.

Данные о составителе отзыва:

ФИО:	Байкин Алексей Николаевич
Почтовый адрес:	пр. Академика Лаврентьева, 15, Новосибирск, 630090
E-mail:	alexey.baykin@gmail.com
Телефон:	+7 (960) 779-31-96
Название организации:	ФГБУН Институт гидродинамики им. М.А. Лаврентьева СО РАН
Должность:	старший научный сотрудник лаборатории Цифровых и интеллектуальных систем добычи углеводородов

Подпись А.Н. Байкина
Учёный секретарь
к.ф.-м.н.