

ОТЗЫВ ОФИЦИАЛЬНОГО ОППОНЕНТА

на диссертационную работу **Пещеренко Александры Борисовны**
«Быстрые расчётные модели сложной механики гидроразрыва и
кислотной обработки пласта», представленную на соискание учёной
степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.6.9. —
«Геофизика»

Диссертация Пещеренко Александры Борисовны посвящена теме моделирования гидравлического разрыва пласта (ГРП) — технологии интенсификации добычи углеводородов за счёт создания в продуктивном пласте протяженных трещин, выполняющих роль высокопроводящих каналов, обеспечивающих приток флюида к скважине при добыче. Для создания трещины гидроразрыва в пласт нагнетают жидкость под высоким давлением, превышающим давление разрушения породы. Закрепление трещины происходит либо за счет закачки расклинивающего агента – проппанта, либо путем травления стенок трещины при кислотном ГРП. Моделирование распространения трещины ГРП — это сложная сопряжённая задача течения вязкой жидкости в трещине, упругой деформации пласта, разрушения породы на фронте трещины, транспорта проппанта, утечек жидкости ГРП в пласт через стенки трещины, задача, которая, как правило, требует численного моделирования. Не существует универсальной модели ГРП. В последние годы в результате «сланцевой революции» и интереса к трудноизвлекаемым запасам ГРП из опции превратился в необходимость: технология многостадийного гидроразрыва пласта на горизонтальных скважинах (МГРП на ГС) применяется повсеместно на российских и зарубежных нефтедобывающих промыслах. Для построения наиболее рациональных дизайнов ГРП требуется решение обратных и оптимизационных задач, что требует создания

эффективных математических моделей, учитывающих основные физические факторы, о способные выполнять быстрые расчеты на обычном персональном компьютере. Этим обусловлена **актуальность** рассматриваемой 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.

Тема **раздела 1** — вычислительно эффективная модель распространения трещины ГРП. Для моделирования используется подход (Biot, Masse, and Medlin 1986), суть которого — в записи упрощённых уравнений распространения трещины ГРП при помощи лагранжева формализма классической механики. Такая запись сводит решение задачи к решению нескольких ОДУ, что не представляет вычислительной сложности (время расчёта ~0.01 с). Этот подход, будучи гибким и перспективным, на первый взгляд, при записи уравнений для усложнённой задачи на основе (Biot, Masse, and Medlin 1986) привёл автора к весьма громоздким формулам. Поэтому, несмотря на то что результаты моделирования были **достоверными** и совпадали с точными решениями для трещины ГРП в предельных случаях, автор решила не развивать этот подход, так как моделирование приближенной к реальности задачи в слоистой среде привело бы к уравнениям, правильность которых проверить было бы практически невозможно.

Раздел 2, продолжая тему первого раздела, отвечает на вопрос о том, как создать «быстрый» симулятор ГРП. Подход раздела 2 — полуаналитический. Трещина имеет форму прямоугольного параллелепипеда. В этом подходе распространение каждого кончика трещины (верхнего, нижнего, правого и левого) анализируют отдельно, вычисляя, при каких условиях выполняется

равенство $K_I = K_{IC}$, что делает новую модель более **достоверной**, чем P3D, в предсказании высоты трещины в сложных случаях типа *runaway height growth*, что подтверждается сравнениями с коммерческими P3D и PL3D симуляторами в конце раздела 2. Кроме того, новая модель была **валидирована** при помощи температурного и CHSA-каротажей. Модель включает взаимодействие трещин через поле напряжений и чувствительна к контрастам коэффициента утечек по модели Картера в зонах, что позволило автору получить **новые** зависимости распространения трещины ГРП по высоте при контрастах коэффициента утечек $C_L(z)$. **Практическая значимость** новой модели не вызывает сомнения, кроме того, она была интегрирована в программный комплекс на базе Petrel для планирования разработки месторождений.

Раздел 3 затрагивает уже другую задачу. Рассматривается карбонатный коллектор с сильной естественной трещиноватостью. В такие коллекторы чаще всего, как в ходе ОПЗ, так и в ходе ГРП, нагнетают раствор кислоты. Необходимо понять, как естественные трещины будут реагировать на изменение давления: разрушаться, сдвигаться, открываться либо закрываться, причём сделать это за разумное время, поэтому явная симуляция DFN не подходит; одновременно, важно учитывать химическую реакцию пласта с раствором кислоты. На данный момент существуют очень подробные и точные механические модели сетей естественных трещин DFN, быстрые модели эффективной среды (Warren and Root 1963) и, как отдельный класс моделей, модели кислотного разъедания стенок трещины (Ugursal 2018), а рынок сопряжённых моделей на данный момент практически свободен. что делает задачу построения такого симулятора **актуальной**. В диссертационной работе автор показывает, как можно объединить модель эффективной среды и модель химической реакции. Это приводит к системе уравнений, состоящей из

нелинейного анизотропного уравнения диффузии давления, уравнения транспорта кислоты и уравнения химической реакции стенок трещин с кислотой. Использование сопряжённой модели позволило воспроизвести полевые наблюдения снижения забойного давления при начале нагнетания раствора кислоты на забое скважины и резкого снижения дебита добычи за счёт закрытия естественных трещин, что показывает **достоверность** результатов моделирования. Симуляция с помощью новой модели занимает около 10 с.

Задача **раздела 4** также связана с повышением эффективности инженерных рабочих процессов, только подход к этой проблеме в разделе 4 устроен несколько иначе. Исследуется перепродавка — ситуация при выполнении работы проппантного ГРП, при которой в запроппированную трещину проникает небольшое количество «чистой» жидкости, что может привести к появлению обеднённых проппантом областей вблизи перфорационных отверстий и, следовательно, снижению дебитов добычи. Автор проводит численное моделирование перепродавки с высоким пространственным и временным разрешением при помощи коммерческого симулятора распространения трещины ГРП (Velikanov et al. 2018) и транспорта проппанта и делает ряд **практических выводов**, цель которых — облегчить задачу дизайна ГРП с возможной перепродавкой для полевых инженеров. Главным параметром, отвечающим за особенности геометрии области перепродавки, является, по наблюдениям автора, контраст вязкости жидкости перепродавки и флюида, который остаётся в трещине. Большой контраст вязкости приводит к картине неустойчивости Саффмана — Тейлора, а близкие значения вязкости жидкостей дают менее благоприятное поршневое вытеснение.

Раздел 5 предлагает полезное изобретение, описанное в соответствующем патенте Российской Федерации за авторством диссертанта и её научного руководителя Чупракова Д. А. — технологию проведения ГРП на ГС, при которой параллельно скважине ГРП бурят новую скважину, цель которой — создать поле пороупругих напряжений, «захватывающее» кончик трещины. В разделе приводятся аналитические формулы для поля напряжений от двух скважин, заполненных жидкостью под давлением, и на их основе диссертант показывает, при каких отклонениях от «идеального» сценария метод сдерживания роста трещины ГРП будет работать.

Среди положительных качеств рассматриваемой работы можно отметить

- Проявленное автором мастерство в построении быстрых математических моделей развития трещин МГРП, использование приближенных и асимптотических решений, выделение основных действующих физических факторов и их математическое описание в рамках простых, но эффективных вычислительных модулей;
- Мотивация постановок задач требованиями оптимизации технологических процессов нефтедобычи и соотнесение полученных результатов с практическими рекомендациями для инженеров;
- Широкий спектр рассматриваемых задач и эрудиция автора по различным аспектам моделирования ГРП и применяемым математическим приемам;
- Четкая формулировка задач с перечислением всех управляющих параметров, описываемых физических эффектов и сделанных предположений.

К работе имеются следующие замечания и рекомендации по дальнейшему развитию:

1. В реальной практике литологическое строение часто пласта характеризуется высокой степенью неоднородности и отличается от классической схемы с выделенным продуктивным горизонтом, окаймленным сверху и снизу барьерами по сжимающим напряжениям. В таких случаях даже относительно тонкие пропластки со значительным контрастом напряжений могут приводить к ограничению роста трещины или, наоборот, прорыву трещины в соседние горизонты. Применяемые в главе 2 усреднения свойств пласта не позволяют отслеживать такие особенности, хотя приведенный в п. 2.4.4 пример показывает, что модель способна обрабатывать их вполне правдоподобно. Было бы полезно провести сравнение с симуляторами на основе модели PL3D и выявить область применимости построенной модели с точки зрения литологического строения пласта.
2. В работе не реализован механизм одновременного роста трещин с учетом неоднородного распределения закачиваемого флюида между различными трещинами ГРП. Это было бы полезно как для планирования подобных работ по ГРП, так и для реализации в качестве модуля расчета распределения потоков для более продвинутых симуляторов роста трещины.
3. Рассмотренная в п. 2.4.6 задача о взаимодействии растущих трещин с существующими является очень важной при поперечной разработке пласта (когда скважины бурятся вдоль минимального сжимающего напряжения). Однако для корректного моделирования раскрытия трещины необходимо учитывать режимы работы существующих скважин и трещин и вызываемое этим изменение порового давления. Дополнение модели таким фактором позволило бы значительно расширить ее область применимости.

4. Не ясно, какой физический механизм объясняет существенную немонотонность роста трещин в высоту, отмеченный в разделе 2.4.7 и не является ли это артефактом вычислительной модели.
5. В разделе 2.4.8. предполагается рост трещин на горизонтальной скважине с азимутом $89,9^{\circ}$. При этом, как можно понять из текста, предполагается, что трещины распространяются под углом $0,1^{\circ}$ к скважине вблизи друг друга, но не сливаясь между собой. Данное предположение противоречит интуиции, поскольку наведенные предыдущей трещиной сжимающие напряжения локально меняют общую картину напряжений, что заставит следующую трещину повернуть в сторону существующей и привести к их слиянию. Необходимо провести более подробный анализ этой ситуации в рамках модели, учитывающей направление развития трещины в зависимости от локальных напряжений.
6. В главе 4 моделируется структура зоны закрепленной трещины ГРП вблизи интервала перфораций, вызванная промытием каналов внутри трещины при перепродавке жидкости. Как следует из текста работы, распределение проппанта внутри закрепленной трещины фиксируется на момент окончания процедуры закачки. При этом не учитывается миграция и оседания проппанта в момент закрытия трещины (в том числе, с учетом реологии жидкости продавки), что играет существенную роль для финального распределения проппанта. Для выработки практических рекомендаций важно также учитывать способность жидкостей с разной реологией к очистке скважины от проппанта и остатков других жидкостей. Необходимо моделировать эти факторы для более точного описания влияния перепродавки на дальнейшее функционирование трещины.

7. Описанный в главе 5 способ удержания от распространения трещины в высоту носит скорее методический характер, поскольку не учитывает реальные технологические и экономические ограничения. В частности, нет учета влияния дополнительной скважины на изменение порового давления внутри продуктивного пласта, что можно использовать как еще один управляющий фактор для контроля процедуры ГРП.

Приведенные замечания носят характер рекомендаций к дальнейшему улучшению работы и не влияют на ее положительную оценку. Диссертационная работа Пещеренко Александры Борисовны является целостным, самостоятельным научным исследованием, отличающимся своей новизной. Сделанные замечания не меняют общего положительного впечатления от диссертации, выполненной на актуальную тему исследования глубинного строения коллизионной. Диссертационная работа носит теоретический и прикладной характер, является оригинальным, самостоятельным исследованием, имеющим существенное значение для развития науки в области специальности 1.6.9. — «Геофизика» и полностью соответствует требованиям и п. 9 Постановления «О порядке присуждения ученых степеней» от 24 сентября 2013 г. № 842. Таким образом, диссертант Пещеренко А. Б. заслуживает присуждения ей учёной степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.6.9. — «Геофизика».

Официальный оппонент Головин Сергей Валерьевич,

доктор физико-математических наук, профессор РАН, Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Новосибирский национальный исследовательский

государственный университет» (НГУ), механико-математический факультет, профессор кафедры теоретической механики.

Почтовый адрес: 630090, Новосибирск, ул. Пирогова, 1 (НГУ, механико-математический факультет).


E-mail: s.golovin@g.nsu.ru.

Я, Головин Сергей Валерьевич, даю согласие на обработку моих персональных данных и их включение в документы, связанные с работой диссертационного совета.

«30» августа 2023 г.

 / Головин С. В.

Подпись Головина С. В. заверяю.

 / Тарабан Е.А.

ПОДПИСЬ ЗАВЕРЯЮ
Ученый секретарь НГУ 

