

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»

Технология гидроразрыва пласта (ГРП), которой посвящена бóльшая часть работы Александры Борисовны Пещеренко «Быстрые расчётные модели сложной механики гидроразрыва и кислотной обработки пласта», существует с середины XX века, начиная с работ С.А. Христановича, Ю.П. Желтова, Г.И. Баренблатта. Казалось бы, задача *моделирования* ГРП за прошедшее с начала практики время могла исчерпать себя, но это не так. **Актуальность** многих нерешённых задач в сфере моделирования ГРП, в частности — тех, которые описаны в диссертационной работе Пещеренко А. Б., вызвана постоянно меняющимися требованиями нефтегазовой индустрии к моделям ГРП. С одной стороны, ресурсы традиционных коллекторов истощаются, с другой — потребность в углеводородах сохраняется на высоком уровне. Таким образом, необходимы новые симуляторы. Поэтому работа А. Б. Пещеренко, кроме актуальности, демонстрирует существенную **практическую значимость**, на что указывает и тот факт, что часть результатов работы была внедрена в коммерческие программные комплексы, такие как Petrel.

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 и раздел 2** описывают разные подходы к решению задачи о распространении трещины ГРП в слоистой среде. **Раздел 1** основан на полуаналитическом подходе Biot et al. (1986), где уравнения классической механики в формулировке Лагранжа (лагранжев формализм) напрямую, при ряде допущений, приводят к системе обыкновенных дифференциальных уравнений, которые решаются численно. **Научная новизна** первого раздела состоит в том, что автор, на основе методики Био (1986 г.), получила новые уравнения для трещины, асимметричной по длине, где левое и правое относительно точки инициации трещины крылья имеют различную длину.

Полученные решения были верифицированы сравнением с точными решениями для предельных случаев распространения трещины ГРП. Оказалось, что улучшение точности метода имеет ограничения технического характера. Увеличение количества степеней свободы приводит к технически сложной аналитической реализации.

**Новый подход представлен в разделе 2.** Здесь строится полуаналитическая модель трещины ГРП в форме прямоугольного параллелепипеда, где кончик трещины (правый, левый, верхний и нижний относительно точки инициации) — это соответствующая грань параллелепипеда. Для такой трещины записывают аналитические закон сохранения массы с учётом утечек, уравнение течения вязкой жидкости, закон упругости и, наконец, уравнение распространения фронта трещины в с условием равенства коэффициентом интенсивности напряжений (КИН) предельного значения  $K_I = K_{IC}$ . Скорость такого расчёта весьма велика — несколько сотых доли секунды на один расчёт. В силу принятых упрощений, верификация модели не показывает, точного совпадения результатов этой новой модели с точными расчётами в предельных случаях  $K$ ,  $\tilde{K}$ ,  $M$ ,  $\tilde{M}$  для «классических» моделей, но это компенсируется большой скоростью расчетов.

**Валидация** на основе полевых измерений температуры и акустических эффектов показала, что новая модель достаточно точно (в пределах 10 %) определяет высоту трещины, а сравнение с коммерческими симуляторами показало, что новая упрощённая модель по характеру предсказания высоты в геомеханически сложных условиях близка к планарной трёхмерной. **Научная новизна** этого раздела состоит в проведении исследований о характере распространения трещины в слоистой среде, где единственное свойство, которое неоднородно по вертикали, — это коэффициент утечек по модели Картера. Автор выяснила, что трещина будет распространяться по высоте преимущественно в пропласток с наименьшими утечками.

**Третий раздел** посвящён уже другой задаче: описанию распространения трещины ГРП и флюида в сильно трещиноватом карбонатном коллекторе с учётом химической реакции карбонатной породы с кислотой. **Научная новизна** этого исследования состоит в том, что, при наличии большого количества моделей отдельно распространения флюида и отдельно химической реакции, моделей, сопрягающих эти процессы, по утверждению автора, на момент исследования литературы, не существовало. Новая модель

основана на подходе эффективной среды в сочетании с уравнением транспорта и реакции кислоты. Моделирование воспроизвело результаты полевых испытаний, характерные для карбонатных коллекторов: во-первых, резкое падение давления при поступлении кислоты на забой и, во-вторых, резкое снижение дебита добычи в начале эксплуатации скважины с ГРП в трещиноватом коллекторе что показывает **достоверность** результатов моделирования. Расчёт варианта в представленной автором новой модели занимает около 10 секунд.

В разделе 4 автор описывает ряд численных экспериментов по моделированию «перепродавки» с помощью высокоточного симулятора распространения трещины ГРП и транспорта неньютоновской жидкости в смеси с пропантом в трещине. Сам симулятор не является авторским (Velikanov et al. 2018) и был использован как инструмент исследований. Целью данной части работы было выявить основные факторы, которые влияют на геометрию области перепродавки. Выводы, которые были сделаны, представляют **научную новизну**, так как, согласно проведённому автором исследования литературы, результаты экспериментов по *сопряжённому* моделированию транспорта гидросмеси и распространению трещины ГРП не публиковались. Единственным действительно важным фактором оказался контраст вязкостей гидросмеси в трещине ГРП и жидкости перепродавки: при вытеснении более вязкой жидкости (сшитый гель) менее вязкой жидкостью (линейный гель) (соотношение вязкостей 1:10) наблюдается картина неустойчивости Саффмана — Тейлора («вязкие пальцы»). Если вязкости жидкостей близки, то наблюдается поршневое вытеснение жидкости ГРП жидкостью перепродавки.

В разделе 5 изложены теоретические обоснования изобретения, описанного 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 напряжений, «захватывающее» и тормозящее распространение фронта трещины по высоте. В разделе приводятся аналитические формулы для поля напряжений от двух скважин, заполненных жидкостью под давлением. На их основе показано, при каких отклонениях от «идеального» сценария метод сдерживания роста трещины ГРП по высоте будет работать.

Следует отметить, что автор достаточно детально знает состояние научных исследований по теме диссертации. Об этом свидетельствует приведенный во введении обзор работ. Он сам по себе заслуживает высокой оценки.

Задачи, решаемые в диссертации чрезвычайно сложны физически. При этом в них присутствует большая степень неопределённости параметров. В связи с этим практическая возможность моделирования приводит к необходимости использования достаточно большого количества упрощающих предположений. Тем не менее, **достоверность** полученных результатов не вызывает сомнений, поскольку автор использует апробированные методы и проводит верификацию с результатами других авторов и там, где возможно – валидацию с результатами полевых испытаний.

Автореферат правильно и достаточно полно отражает содержание диссертации. Результаты работы опубликованы в 7 статьях и защищены 1 патентом.

К работе есть следующие замечания:

1. Одним из методов первого раздела является использование уравнений Лагранжа. Известно, что строгое обоснование применимости принципа дано для систем с конечным числом степеней свободы. В работе не обсуждается проблема применимости метода к задачам с заведомо бесконечным числом степеней свободы.
2. Физическая трактовка «чистого давления» введенного на стр.48 не очень понятна. Давление внутри трещины непрерывно. Введенное «чистое давление» имеет разрыв первого рода в нуле. Это в свою очередь приводит к разрыву раскрытия трещины. Насколько это соответствует действительности спорно.
3. Верификация разработанной модели ассиметричной трещины проведена для случая симметричной трещины, где совпадение заранее должно быть хорошим ввиду одинаковых физических предположений. Насколько модель адекватна в приложении к несимметричным трещинам из работы неясно.
4. Известно, что при взаимодействии параллельных трещин, с их ростом они поворачивают и перестают быть плоскими. Насколько этот факт противоречит предположениям о параллельных плоских трещинах в разделе 2 ?

5. В разделе 2 на стр.61 дано выражение для функции Грина. Решением какой физической задачи является данная функция из текста диссертации непонятно. Ссылка на формулу (39) ничего не проясняет, поскольку в формуле (39) использована двухточечная функция, задающая интегральную связь между полем перемещений и давлением в трещине для плоской задачи.
6. С одной стороны, в разделе 2 предполагается, что раскрытие трещины имеет форму прямоугольного параллелепипеда. С другой стороны, для нахождения коэффициента интенсивности напряжений применяется формула плоской задачи для эллиптической трещины (2.34) – (2.36) на стр.65.
7. Верификация метода (раздел 2) проведена сравнением с одиночными трещинами путём выбора свободного (подгоночного) параметра. Не очень ясно останется ли решение близким к практике для нескольких трещин.
8. Вызывает вопрос сильное упрощение скорости реакции (формула 3.64 на стр.111), которое мотивируется экономией времени решения.
9. В разделе 5, считается, что поле напряжений от двух скважин можно получить сложением полей напряжений от каждой из них. Поскольку выполнение граничных условий на поверхности каждой из скважин будет влиять на истинное поле напряжений, данное обстоятельство требует разъяснений.

Высказанные замечания не меняют общего положительного впечатления от диссертации, выполненной на актуальную тему, востребованную в приложениях.

Диссертационная работа **Пещеренко Александры Борисовны** является целостным, самостоятельным научным исследованием, отличающимся своей новизной. Диссертационная работа является оригинальным исследованием, имеющим существенное значение для развития науки в области специальности 1.6.9. — «Геофизика» и представляет собой законченное научное исследование, которое по актуальности, научному уровню и практической значимости полученных результатов соответствует всем требованиям, предъявляемым ВАК РФ к кандидатским диссертациям,



установленным в Постановлении Правительства РФ от 24.09.2013 № 842 (ред. от 18.03.2023) «О порядке присуждения ученых степеней».

Таким образом, диссертант **Пещеренко Александра Борисовна** заслуживает присуждения ей учёной степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.6.9. — «Геофизика».

**Официальный оппонент Звягин Александр Васильевич,**

доктор физико-математических наук, профессор, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Московский государственный университет имени М.В.Ломоносова» (МГУ), механико-математический факультет, профессор кафедры газовой и волновой динамики.

**Почтовый адрес:** 119991, ГСП-1, Москва, Ленинские горы, д. 1, главное здание, механико-математический факультет МГУ.

**E-mail:** [zvyagin.aleksandr2012@yandex.ru](mailto:zvyagin.aleksandr2012@yandex.ru)

Я, Звягин Александр Васильевич, даю согласие на обработку моих персональных данных и их включение в документы, связанные с работой диссертационного совета.

«20» июля 2023 г.

Звягин / Звягин А. В.

Подпись Звягина А. В. заверяю.

декан мех-мат ф-та МГУ  
/ Шагарев А.И.

