

ОТЗЫВ ОФИЦИАЛЬНОГО ОППОНЕНТА
доктора геолого-минералогических наук Пушкарева П.Ю.
на диссертационную работу Буденного С.А.
«Численное моделирование многостадийного гидроразрыва
пласта в горизонтальной скважине»,
предоставленную на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук
по специальности 25.00.10 – «геофизика, геофизические методы поисков полезных
ископаемых»

Диссертационная работа Буденного Семёна Андреевича посвящена построению набора математических моделей, необходимость которых возникает при численном моделировании многостадийного гидроразрыва пласта (ГРП). Актуальность работы обусловлена активным вовлечением в разработку нетрадиционных месторождений, требующих как более сложных технологий ГРП, так и более точных и обоснованных математических моделей.

Во **введении** представлен обзор литературы, обоснована актуальность проблемы, описана практическая и теоретическая значимость работы, представлены цели и задачи работы, научная новизна, методология исследования, а также сформулированы положения, выносимые на защиту.

В **первой главе** диссертации представлена рассмотрена математическая модель роста трещины гидроразрыва пласта (ГРП) в слоистой среде в рамках модели РЗД. Описаны основные уравнения, описывающие перенос смеси жидкости степенной реологии и проппанта в канале трещины переменного поперечного сечения. В рамках основных уравнений механики хрупкого разрушения описано развитие единичной трещины нормального разрыва. Введен коэффициент кажущейся трещиностойкости для неявного учета вязкостной диссипации энергии. Описан численный алгоритм, используемый соискателем для решения написанной системы уравнений. Обосновано разделение гидродинамической и геомеханической задач.

Во **второй главе** диссертации описан подход к численному моделированию многостадийного ГРП. К ранее описанным выше задачам течения суспензии по трещине и роста трещины в высоту добавлено течение в стволе скважины и механическое взаимодействие трещин. Рассмотрен подход учета взаимного влияния трещина за счёт индуцированных напряжений в рамках подхода разрывных смещений. Описан численный алгоритм решения поставленной задачи.

В **третьей главе** представлены результаты по следующим задачам: рост трещины в трехслойной слоистой модели; учет вязкостной диссипации при росте трещины в многослойной среде; влияние концевое экранирования на рост трещины ГРП; представлен

результат расчета для конкретного геологического разреза и условий закачки; продемонстрированы результаты моделирования интерференции нескольких трещины.

В **заключении** приведены результаты диссертационного исследования.

В **приложении** представлены выкладки для вывода коэффициента интенсивности напряжений на кончике трещины нормального отрыва для заданного профиля напряжений.

Результатами диссертационного исследования являются: расширение классической модели ГРП РЗД до модели, учитывающей неявно вязкостную диссипацию энергии в процессе роста трещины в геологическом разрезе, неоднородном по упруго-прочностным свойствам, путем ввода эффективного коэффициента трещиностойкости; подход расщепления геомеханической и гидродинамической задач, обоснованный наличием временной разномасштабности процессов формирования квазиравновесной трещины (характерные скорости распространения порядка скорости звука в среде) и конвективного массопереноса в канале трещины процесс разрушения породы рассматривается в статической постановке; комплексный подход, позволяющий решать совместно задачи упругости и разрушения в породе с неоднородным геологическим разрезом, массопереноса смеси жидкости неньютоновской реологии и дисперсной фазы в канале трещины и в стволе скважины, а также взаимного влияния трещин друг на друга за счет индуцированных напряжений.

Практическая ценность диссертационной работы заключается в том, что полученные результаты использованы в развитии прикладных программных комплексов для планирования дизайнов многостадийного ГРП.

ЗАМЕЧАНИЯ ПО ДИССЕРТАЦИИ

Недостатком исследования является отсутствие экспериментов для проверки корректности физико-математической модели (по причине отсутствия возможности проводить такие эксперименты).

В условиях полноценно созданного программного комплекса для численного моделирования роста трещины ГРП в диссертационной работе не хватает результатов применения данного комплекса в приложении к промышленным задачам.

В рамках диссертационной работы представило бы интерес решение обратной задачи, т.е. уточнения геологических данных путем ретроспективного анализа ранее проведенных работ ГРП.

Отдельные замечания имеют в основном редакционный характер, такие как опечатки и грамматические неточности (см., например, стр. 7, 31, 42, 55, 65), а также неполнота описания используемых данных (стр. 63-65), что никак не влияет на научную ценность работы.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Указанные выше замечания не умаляют достоинств выполненного Буденным Семеном Андреевичем научного исследования. Результаты диссертационной работы вносят существенный вклад в развитие оптимизационных задач при планировании многостадийного гидроразрыва пласта. Результаты работы опубликованы в ведущих изданиях и докладывались на многочисленных конференциях, в том числе международных. Получено 6 свидетельств о регистрации программ для ЭВМ. Предоставленная к защите диссертационная работа удовлетворяет всем требованиям «Положения о присуждении ученых степеней», утвержденного Постановлением Правительства РФ N842 24 сентября 2013 г., и ее автор Буденный Семен Андреевич заслуживает присуждения ему ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 25.00.10 – «геофизика, геофизические методы поисков полезных ископаемых».

Я, Пушкарёв Павел Юрьевич, согласен на включение моих персональных данных в документы, связанные с защитой диссертационной работы Буденного Семена Андреевича, и их дальнейшую обработку.

Официальный оппонент Пушкарёв Павел Юрьевич, доктор геолого-минералогических наук, специальность ВАК 25.00.10 – «Геофизика, геофизические методы поисков полезных ископаемых», профессор геологического факультета Московского государственного университета имени М.В. Ломоносова (кафедра геофизических методов исследования земной коры).

Адрес: 119991, Москва, Ленинские горы, д. 1; телефон: +7 495 939-49-12; E-mail: pavel_pushkarev@list.ru

4 декабря 2019 г.

Пушкарёв П.Ю.

