

ОТЗЫВ

официального оппонента доктора физико-математических наук, профессора Губайдуллина Амира Анваровича на диссертацию Байкина Алексея Николаевича «Динамика трещины гидроразрыва пласта в неоднородной пороупругой среде», представленную на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.02.05 — «Механика жидкости, газа и плазмы»

Актуальность темы исследования

Диссертационная работа А. Н. Байкина посвящена исследованию динамики распространения трещины гидроразрыва пласта (ГРП) в неоднородной пороупругой среде с помощью разработанных автором численных алгоритмов и методик. ГРП является одной из ключевых технологий по интенсификации добычи нефти во всем мире. Понимание физических процессов, происходящих в продуктивном пласте, и оптимальное проектирование данной технологии важны как с экономической точки зрения, так и с точки зрения рационального извлечения полезных ископаемых, что обуславливает актуальность данной инженерной и научно-технической задачи. По причине сложности проведения натурных и лабораторных экспериментов основным инструментом для предсказания размеров трещины ГРП является математическое моделирование. В современных реалиях, все больше и больше нефтегазовых месторождений имеют сложное неоднородное геологическое строение. Важную роль играет давление в порах породы, которое оказывает влияние на направление распространения трещины ГРП. Этот факт является критическим для успешного использования этой технологии и вызывает необходимость в новых математических моделях, где эти особенности учитываются. Но конструирование новых моделей должно сочетаться с разработкой эффективных алгоритмов их компьютерной реализации и решением задач, актуальных для усовершенствования технологий. Всем этим выгодно отличается данная работа.

Обоснованность и достоверность полученных результатов

При формулировании математических постановок задач автор опирается на физические законы, общепринятые в механике сплошных сред, приемлемые упрощающие предположения при выводе моделей, аппарат математического анализа и теории дифференциальных уравнений. В качестве

метода для численной реализации был выбран широко известный метод конечных элементов, успешно применяемый для приближенного решения уравнений в частных производных.

Корректность результатов расчетов, приведенных в диссертации, подтверждается проверками построенных алгоритмов на численную сходимость, сравнением полученных результатов с известными численными и аналитическими данными из литературы, а также непротиворечивостью выводов, сделанных в диссертации, здравому смыслу.

Научная новизна, полученных результатов

Научная новизна работы состоит в следующем.

В диссертации представлен общий подход к моделированию распространяющихся трещин ГРП, при котором отсутствует необходимость явно отслеживать положения вершины трещины в процессе расчета. Преимущество данного метода заключается в возможности применения стандартных методов решения нелинейных уравнений для связывания процесса течения вязкой жидкости по трещине и ее утечек в пласт с упругой реакцией стенок трещины на приложенное давление и продвижение вершины трещины.

Для модели Христиановича – Гирстма – де Клерка (KGD) в режиме вязкой диссипации предложенный подход был реализован в виде нового численного алгоритма, позволяющего рассчитывать трещины ГРП в пластах с произвольно заданной зависимостью скорости утечек жидкости гидроразрыва в пласт от давления, не ограничиваясь простейшим законом утечек Картера.

Для моделирования развития трещины ГРП в неоднородной пороупругой среде в условиях плоской деформации был разработан численный алгоритм на основе метода конечных элементов, в котором отсутствует необходимость явно отслеживать положение вершины трещины на каждом шаге по времени. Оригинальность используемого подхода заключается в том, что двумерная задача пороупругости и одномерная задача о течении вязкой жидкости по трещине решаются в единой слабой формулировке, что позволяет избежать специальных методов для корректного связывания этих задач.

Для задачи о стационарной полубесконечной трещине в пороупругой среде было построено и проанализировано новое точное автомодельное решение.

На основании результатов вычислительных экспериментов в диссертации впервые достаточно подробно проанализировано влияние пороупругих эффектов, в частности порового давления, на размеры образующейся трещины. В исследовании также наглядно показано, как наличие различий в проницаемости и сжимающих напряжениях в соседних слоях горной породы влияет на форму трещины, а также скорость и направление ее распространения.

Теоретическая и практическая значимость полученных автором результатов

Численные алгоритмы и методики, разработанные в диссертации, могут использоваться для симуляции развития трещин ГРП на начальном этапе закачки без добавления проппанта. Постановка задачи и численный алгоритм, предложенные в главе 2, допускают обобщение на трехмерный случай, что позволит впоследствии моделировать пространственное распространение трещин ГРП в неоднородной пороупругой среде.

Анализ влияния порового давления и влияния неоднородностей в физических характеристиках пласта дает более полное понимание процесса гидроразрыва в пороупругих средах, а его результаты могут быть основой для выработки практических рекомендаций при совершенствовании технологии ГРП и для инженеров, работающих в нефтегазовой отрасли.

Оценка содержания диссертации, ее завершенность

Работа объемом 94 страницы включает введение, 2 главы основного содержания, заключение, список использованных источников из 115 наименований.

Во *введении* обосновывается актуальность темы исследования, формулируются цели и задачи диссертации, ее научная новизна, теоретическая и практическая значимость, а также формулируются положения, выносимые на защиту. Кроме этого, приводится обширный обзор литературы по тематике моделирования гидроразрыва пласта.

В *первой главе* автором описывается классическая математическая модель трещины ГРП Христиановича — Гиртстма — де Клерка. В предположении, что трещина распространяется в режиме вязкой диссипации,

для данной модели проводится построение численного алгоритма, в котором отсутствует необходимость отслеживать положение вершины трещины на каждом шаге по времени. Данный алгоритм проверяется на сходимость путем сравнения с известным аналитическим решением. В конце главы демонстрируется возможность алгоритма адекватно рассчитывать распространение трещины в породах, где величина утечек жидкости в пласт имеет заданную зависимость от давления.

Во *второй главе* рассматривается модель распространения трещины гидроразрыва в неоднородной пороупругой среде в условиях плоской деформации, которая применяется к исследованию влияния порового давления на динамику развития трещины в неоднородной пороупругой среде. Вначале описывается общая математическая постановка задачи. После этого при некоторых упрощающих предположениях строится новое точное решение для стационарной полубесконечной трещины в пороупругой среде и дается его интерпретация. Далее для предложенной модели описывается численный алгоритм, основанный на методе конечных элементов, в котором отсутствует необходимость явно отслеживать положение вершины трещины в процессе расчета. Численный подход верифицируется с использованием точного автомодельного решения, построенного автором, исследуется численная сходимость, а также проводится сравнение с данными, известными из литературы. Приводятся результаты вычислительных экспериментов, которые показывают существенное влияние пороупругих эффектов (в том числе порового давления) на размеры получающейся трещины. Для этого отдельно рассматриваются связанная, частично связанные и несвязанная задачи Био, для которых объясняются причины различий в полученных результатах. В конце автор рассматривает трещину ГРП в слоистом пласте с двумя типами неоднородностей: по сжимающим напряжениям и по проницаемости. Результаты расчетов показывают, что наличие даже небольшого контраста напряжений приводит к несимметричному раскрытию. В случае наличия скачка проницаемости поведение трещины в значительной степени зависит от степени влияния порового давления на напряженное состояние.

В *заключении* формулируются основные результаты и выводы работы.

Замечания к диссертации

1. В ряде работ рассматривается взаимодействие трещины гидроразрыва с природным разломом. Было бы интересно применить развитый в данной работе подход к решению этой задачи тем более,

что в параграфе 2.6 работы уже рассмотрены ситуации с наличием двух слоев со скачком напряжений или проницаемости.

2. Обзор литературы в работе выполнен достаточно качественно, однако в большей части рассмотрены англоязычные источники в ущерб отечественным. Так, например, выпали из рассмотрения 5 статей Смирнова Н. Н. и др., 2 статьи Акулича А. В. И др., 4 статьи Гордеева Ю. Н., посвященные автомодельным и численным решениям задач о формировании и распространении трещин гидроразрыва, моделированию гидроразрыва и опубликованные в журналах «Изв. РАН. МЖГ» 1995, №6, 2007, №1, 2008, №3; «ПММ» 1989, №2, 1996, №5; «МТТ» 1996, №5; «Вестник МГУ. Матем., мех.» 2007, №1, 2008, №1; сб. «Современные проблемы матем. и мех.», М., МГУ, 2009.
3. Имеются недостатки в оформлении работы и опечатки. Например, на с. 6 написано de Flerk вместо de Klerk, на с. 13 – напряженного-деформированное состояние, на с. 56 пропущена запятая в предложении «Для того чтобы...», в списке литературы в п. 38 не приведены номер журнала и страницы статьи.
4. В автореферате имеются опечатки, неточные и неудачные словосочетания. Например, на с. 4 вводятся аббревиатуры ГРП и KGD без расшифровки их значений. Фразу на с. 17 «В заключении приведены основные результаты» следует дополнить словами «и выводы», т. к. ниже приводятся не только результаты, но и выводы. На с. 10 и в подписи к рис. 1 слово «измеренные» следует взять в кавычки или заменить на слово «рассчитанные», это же относится и к тексту диссертации. Неудачным, на мой взгляд, является выражение «переменный сценарий закачки» на с. 11.

Соответствие автореферата основным положениям диссертации

Автореферат отражает основные положения, сформулированные в диссертации.

Соответствие диссертации и автореферата требованиям ГОСТ Р 7.0.11-2011

Оформление автореферата и диссертации соответствуют требованиям ГОСТ Р 7.0.11-2011.

Подтверждения опубликованных основных результатов диссертации в научной печати

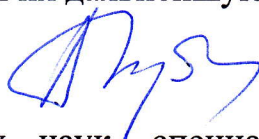
Результаты, представленные в диссертации, докладывались на всероссийских и международных конференциях и обсуждались на семинарах научных организаций. По теме диссертации опубликовано 8 печатных работ, 3 из которых изданы в журналах из списка ВАК.

Заключение о соответствии диссертации критериям, установленным «Положением о присуждении ученых степеней»

Считаю, что диссертация А. Н. Байкина «Динамика трещины гидроразрыва пласта в неоднородной пороупругой среде» представляет собой завершенную научно-квалификационную работу. Она выполнена на высоком научном уровне, содержит новые результаты и удовлетворяет всем требованиям, предъявляемым к кандидатским диссертациям согласно «Положению о присуждении ученых степеней» (постановление Правительства РФ от 24.09.2013 г. № 842). Ее автор, А. Н. Байкин, заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.02.05 — «Механика жидкости, газа и плазмы».

Я, Губайдуллин Амир Анварович, согласен на включение моих персональных данных в документы, связанные с защитой диссертации Байкина Алексея Николаевича, и их дальнейшую обработку.

Официальный оппонент



Губайдуллин А. А.

доктор физико-математических наук, специальность ВАК 01.02.05 — «Механика жидкости, газа и плазмы», профессор, директор Тюменского филиала Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института теоретической и прикладной механики им. С.А. Христиановича Сибирского отделения Российской академии наук, <http://www.timms.tmnsc.ru/>

Адрес: 625026, г. Тюмень, ул. Таймырская, д.74

Телефон: +7(3452) 68-47-56

E-mail: gubai@tmn.ru

Подпись д.ф.-м.н. Губайдуллина А. А. заверяю

Зам. директора ТюмФ ИТПМ СО РАН,

д.ф.-м.н.



Мусакаев Н. Г.

14.11.2016