

ОТЗЫВ

официального оппонента кандидата физико-математических наук Перепечко Юрия Вадимовича на диссертационную работу 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»

Диссертационная работа А.Н. Байкина посвящена разработке численного подхода для эффективного решения задачи гидроразрыва в неоднородной пороупругой среде и его применение к детальному исследованию влияния порового давления и неоднородностей породы на динамику развития трещины гидроразрыва.

Актуальность выбранной темы обусловлена потребностью в новых методах интенсификации добычи углеводородов. Истощение разрабатываемых до недавнего времени нефтяных и газовых месторождений, расположенных в наиболее доступных и изученных районах, приводит к необходимости поиска и разработки новых месторождений в районах со сложными геологическими условиями, таких, как Восточная Сибирь, Арктика, шельфы Баренцева и Охотского морей. Новые разрабатываемые месторождения, наибольшая доля коллекторов которых характеризуется крайне низкой проницаемостью, как правило содержат трудноизвлекаемые запасы углеводородов. Это приводит к необходимости совершенствования применяемых и развитию новых технологий интенсификации и повышения газо- и нефтеотдачи пластов. Одним из основных методов интенсификации разработки сложных нефтегазовых месторождений является гидравлический разрыв пласта (ГРП). Более трети запасов углеводородов в настоящее время можно извлечь только с использованием этой технологии. Разработка нетрадиционных месторождений сланцевой нефти/газа с низкими фильтрационными свойствами, (например, ачимовская, тюменская, баженовская свиты) также возможна только с применением таких технологий стимуляции притоков нефти как бурение горизонтальных скважин с множественными гидроразрывами пласта. Развитие новых подходов в проектировании и управлении гидроразрывом пласта невозможно без развития адекватных математических моделей, учитывающих данные геологических, геофизических и петрофизических исследований. Тем не менее большая часть исследований, посвященных развитию методов ГРП, представленные в работах современных авторов в журналах по разведочной и теоретической геофизике, базируются большей частью на модели пласта как упругой односкоростной среды, либо используется стационарная модель фильтрации в пласт, основанная на соотношении Дарси. При этом, не учитывается определяющая роль взаимодействия процесса фильтрации и деформации породы для характера развития трещины. Модели ГРП, основанные на двухскоростных теориях насыщенных пористых сред, впервые предложенные в работах Я.И. Френкеля и М.А. Биот, в анализе развития трещин активно начали использоваться в последние десятилетия, например, в работах A. Ghassemi, T.T. Гарипова, Y. Kovalyshen. Использование моделей ГРП, основанных на уравнениях пороупругости, позволяет согласованно описывать динамику пород коллектора с учетом его фильтрационных и упругих свойств, не делая каких-либо предположений о геометрических параметрах трещины. Такие параметры будут определяться согласованным взаимодействием возникающих полей напряжений и фильтрационных потоков. Исследование поведения трещины ГРП в сложных неоднородных геологических структурах с учетом влияния порового давления также требует развития более общих математических моделей ГРП, а также эффективных методов для ее численного анализа.

Представленная диссертация посвящена разработке численного подхода для эффективного решения задачи гидроразрыва в неоднородной пороупругой среде и его применение к детальному исследованию влияния порового давления и неоднородностей породы на эволюцию трещины. Особенность развивающегося в диссертации подхода заключается в отсутствие необходимости явно отслеживать положение вершины трещины, а также формулировка задачи в единой слабой постановке, позволяющей одновременно решать двумерные уравнения равновесия и фильтрации и одномерное

уравнение для течения жидкости по трещине, что позволяет эффективно моделировать распространение трещины гидроразрыва.

Научная новизна полученных результатов заключается в том, что соискателем впервые представлен алгоритм для модели трещины гидроразрыва Христиановича – Гиртсма – де Клерка, который не требует явно отслеживать положение вершины трещины и позволяет эффективно моделировать распространение трещины гидроразрыва в случае произвольной зависимости утечек от давления жидкости в трещине. Для моделирования развития трещины гидроразрыва в неоднородной пороупругой среде разработан новый численный алгоритм на основе метода конечных элементов, позволяющей одновременно решать двумерные уравнения равновесия и фильтрации и одномерное уравнение для течения жидкости в трещине. Верификации численного подхода проведено с использованием нового точного автомодельного решения для задачи о стационарной полубесконечной трещине в пороупругой среде. На основе построенной численной модели проведен подробный анализ взаимного влияния фильтрации жидкости и деформирования пористого скелета и влияние порового давления на направление распространения трещины гидроразрыва и ее геометрические характеристики, особенно для сред с неоднородной проницаемостью.

Основные результаты, полученные соискателем можно сформулировать следующим образом:

- разработан численный подход к моделированию гидроразрыва пласта без отслеживания положения вершины трещины и перестраивания расчетной области в процессе расчета, с помощью которого решена задача о периодической закачке жидкости в рамках модели Христиановича – Гиртсма – де Клерка и модели трещины ГРП в пороупругой среде в условиях плоской деформации;
- получено точное автомодельное решение, описывающее дипольное течение в окрестности вершины стационарной полубесконечной трещины в пороупругой среде, которое было использовано для верификации численного подхода;
- выполнен анализ влияния порового давления и наличия контраста проницаемости и сжимающих напряжений на геометрию, динамику и направление распространения трещины гидроразрыва в пороупругой среде.

Достоверность результатов диссертационной работы обоснована представительной серией численных экспериментов. Корректность результатов математического моделирования также подтверждается проделанной проверкой численных алгоритмов на сходимость, в том числе с использованием аналитических решений. Новизна научных результатов, полученных соискателем, подтверждается также публикациями по теме диссертации, докладами на российских и международных конференциях. Основные представленные в диссертации результаты, изложены в опубликованных работах: три статьи в научных рецензируемых журналах из перечня ВАК, пять статей в тезисах докладов и трудах международных и российских конференций и съезда, индексируемого в РИНЦ.

Теоретическая и практическая значимость. Результаты представленной диссертационной работы дают вклад в развитие методов численного решения эллиптико-параболических уравнений с нелинейными краевыми условиями, в частности возникающих в некоторых задачах гидропороупругости со свободной границей. С точки зрения геомеханики выводы, сделанные в работе, дают новое понимание механизмов и степени влияния фильтрационных процессов в неоднородной горной породе на характер распространения трещины ГРП. В свою очередь, эта информация, а также численные модели, изложенные в диссертации, могут быть полезными на практике при предварительном анализе и проектировании технологии гидроразрыва на конкретных месторождениях.

Анализ содержания диссертации. Работа состоит из введения, двух глав, заключения.

Во введении обосновывается актуальность моделирования гидроразрыва пласта, приводится обзор научной литературы по изучаемой проблеме. Список используемой литературы отражает знакомство соискателя с наиболее важными, представленными как в российских, так и в зарубежных изданиях. Введение также содержит формулировку целей работы, кратко представлены задачи и

используемые методы исследования, отмечены новизна и практическая значимость полученных результатов, представлены основные положения, выносимые на защиту, отражен личный вклад соискателя. В конце приводится структура диссертации и кратко ее содержание.

Первая глава диссертации состоит из пяти параграфов. В первой главе представлен анализ классической одномерной модели Христиановича – Гиртсма – де Клерка – симметричной вертикальной трещины гидроразрыва, распространяющейся в бесконечной упругой среде в условиях плоской деформации. В параграфах 1.1 и 1.2 сформулирована постановка задачи распространения трещины гидроразрыва в предположении, что энергия, затрачиваемая на разрушение породы, много меньше энергии вязкой диссипации. Основанный на методе конечных элементов численный алгоритм для решения сформулированной задачи, записанной в слабой формулировке, подробно рассмотрен в параграфе 1.3. Сходимость продемонстрирована в параграфе 1.4 при помощи сравнения численного решения и известного автомодельного полуаналитического решения. Особенностью численного алгоритма является отсутствие необходимости явно отслеживать положение вершины трещины. В параграфе 1.5 с помощью предложенного численного подхода решается задача о периодической закачке жидкости в трещину. Приведенные результаты численных расчетов давления и раскрытия измеренной на скважине трещины демонстрируют возможность предложенного алгоритма адекватно моделировать системы с многоступенчатым сценарием закачки и произвольной зависимостью утечек в пласт от давления жидкости.

Вторая глава диссертации состоит из шести параграфов. Во второй главе представлен анализ модели развития трещины гидроразрыва в пороупругой среде в условиях плоской деформации, а также показано ее применение для исследования влияния давления поровой жидкости и неоднородностей пласта на геометрию и динамику распространения трещины гидроразрыва. В параграфе 2.1 сформулирована математическая постановка задачи. Рассматриваемая насыщенная ньютоновской вязкой жидкостью пороупругая среда характеризуется пористостью, проницаемостью, смещением твердой фазы и поровым давлением. Упрощением модели является использование закона Дарси для определения скорости фильтрации жидкости в пласте. В параграфе 2.2 рассматривается частный случай сформулированной задачи – упрощенная задача о стационарной полубесконечной трещине в однородной пороупругой среде, для которой может быть найдено в явном виде точное решение, описывающее фильтрационное решение, при котором жидкость циркулирует между трещиной и пластом по замкнутым траекториям. Основанный на методе конечных элементов численный алгоритм для решения сформулированной в общем виде задачи, записанной в слабой формулировке, подробно рассмотрен в параграфе 2.3. Это позволяет связать в единой формулировке двумерные уравнения равновесия и фильтрации и одномерное уравнение течения жидкости в трещине. Отличительной особенностью численного алгоритма является отсутствие необходимости явно отслеживать положение вершины трещины. Верификация предложенного численного подхода проводится в параграфе 2.4 при помощи численного воспроизведения точного решения частной задачи и сравнения результатов расчетов с известными решениями из литературы. В параграфе 2.5 при помощи разработанной численной модели исследуется влияние порового давления на геометрические характеристики трещины гидроразрыва. Показано, что в случае полного взаимодействия процесса фильтрации и деформации породы трещина получается наименьшей ширины за счет обратного напряжения и увеличения утечки из-за деформации породы. В случае частичного взаимодействия либо отсутствия взаимодействия процесса фильтрации и деформации породы разного типа трещина получается немного большей ширины. В параграфе 2.6 исследуется динамика трещины гидроразрыва в слоистой пороупругой среде с контрастом в сжимающих напряжениях и проницаемости. Показано, что различие в сжимающих напряжениях приводит к асимметрии трещины. Показано, что в случае достаточно близкого расположения к скважине границы слоев, трещина предпочтительно распространяется по низкопроницаемому слою. В случае более далекого от скважины расположения границы слоев трещина распространяется по высокопроницаемому слою до достижения краем трещины барьера, препятствующему ее дальнейшему расширению. Рост в результате этого давления жидкости в трещине приводит к прорыву трещины в низкопроницаемый слой. Тем самым автором продемонстрирована

принципиальная важность учета пористости окружающей трещину породы при моделировании гидроразрыва пласта.

В заключении сформулированы основные результаты работы.

В целом текст диссертации логично структурирован, написан ясным, правильным языком, достаточно хорошо проиллюстрирована. Автореферат написан понятным языком и дает полное представление о выполненной работе. Оформление структурных элементов диссертации и автореферата соответствует требованиям ГОСТ Р 7.0.11-2011.

Отдельные замечания имеют в основном редакционный характер, такие как опечатки и грамматические неточности (см., например, стр. 8, 13, 20, 33, 37, 50, 57, 60, 73) и неполнота описания используемых переменных (стр. 27, 44), что никак не влияет на научную ценность работы. Хотелось бы только отметить желательность анализа возможности обобщения предложенного метода для моделирования развития трещин гидроразрыва с областью свободной от жидкости в кончике трещины, а также анализа закачки неьютоновской жидкости, как жидкости гидроразрыва, в модели развития трещины в пороупругой среде.

Диссертация соответствует критериям, установленным "Положением о присуждении ученых степеней" по пунктам 10, 11 и 14: (П.10): Диссертация написана автором самостоятельно, обладает внутренним единством, содержит новые научные результаты, выдвигаемые для публичной защиты, и свидетельствуют о личном вкладе автора диссертации в методы численного решения задач гидроразрыва; (П.11): Основные научные результаты диссертации опубликованы в восьми научных работах, три из которых входят в перечень ВАК МОН РФ (на момент опубликования); (П.14): Необходимые ссылки на авторов и источники заимствования материалов в диссертации имеются.

Таким образом, диссертация А.Н. Байкина является самостоятельной, завершенной научной квалификационной работой, имеющей теоретическую, методологическую и практическую ценность. Все основные результаты являются новыми, строго обоснованными и вносят существенный вклад в развитие методов эффективного решения задачи гидроразрыва в пороупругой среде, что имеет важное фундаментальное и прикладное значение. Результаты работы опубликованы в ведущих изданиях и докладывались на многочисленных международных конференциях. Автореферат диссертации соответствует требованиям ВАК МОН РФ и полностью отражает ее содержание. Считаю, что диссертация соответствует требованиям Положения ВАК РФ о порядке присуждения ученых степеней, предъявляемых к кандидатским диссертациям, а её автор, Алексей Николаевич Байкин, безусловно заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.02.05 - Механика жидкости, газа и плазмы.

Официальный оппонент Перепечко Юрий Вадимович,
кандидат физико-математических наук, специальность ВАК 05.13.16 — «Применение вычислительной техники, математического моделирования и математических методов в научных исследованиях»,
старший научный сотрудник Федерального государственного бюджетного учреждения науки
«Институт геологии и минералогии им. В.С. Соболева СО РАН» (ИГМ СО РАН) (<http://igm.nsc.ru>)

Адрес: Россия, 630090, г. Новосибирск, пр. Академика Коптюга 3

Телефон: +7-383-333-26-00

E-mail: perep@igm.nsc.ru

17.11.2016

Ю.В. Перепечко

Подпись с.н.с. Лаборатории моделирования динамики эндогенных и техногенных систем ИГМ СО РАН, к.ф.-м.н. Перепечко Ю.В. заверяю

И.о. ученого секретаря ИГМ СО РАН
к.г.-м.н.



Шарыгин И.С.