

ОТЗЫВ официального оппонента

на диссертационную работу Лапина Василия Николаевича «Моделирование распространения трещин, нагруженных давлением вязкой жидкости», представленную на соискание ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 1.2.2. – Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ

Россия наряду с Венесуэлой и Канадой входит в тройку стран-лидеров по объему запасов тяжелых углеводородов. В настоящее время ввиду низкой рентабельности разработки тяжелой нефти в России, как правило, относят к альтернативным источникам углеводородов. Тем не менее, анализ литературных источников показывает, что за счет освоения таких месторождений добычу можно увеличить на десятки миллионов тонн ежегодно. Одним из эффективных методов интенсификации извлечения углеводородов является гидравлический разрыв пласта.

На данном этапе развития технологий разрыва одномерные приближения при описании течения расклинивающих жидкостей являются недостаточными для корректного описания гидродинамики пласта. Использование синтетических жидкостей и высоких давлений требует доработки традиционных методов расчета. Таким образом, актуальна задача построения критерия распространения трещины гидроразрыва пласта под действием слабосжимаемой жидкости в анизотропном поле напряжений.

Научная новизна работы заключается в постановках задач о гидравлическом разрыве пласта и способах их решения. Автором разработан подход к описанию движения в трещине неньютоновской и слабосжимаемой жидкостей, объединяющий переменность нагрузки в трещине и влияние полости. Предложены численный метод решения уравнений эволюции и критерий выбора направления роста трещины сложной геометрии. Впервые в рамках трехмерной постановки численно описан эффект пережатия трещины, вызванный искривлением ее поверхности. Достоверность результатов основана на использовании базовых уравнений механики континуума, строгой математической постановке задач; подтверждается их согласованием с известными аналитическими решениями, экспериментальными данными и расчетами других исследователей.

Полученные автором результаты обоснованы, обладают научной новизной, имеют теоретическую и практическую значимость. Представленный в работе подход позволяет работать с современными

синтетическими жидкостями сложной реологии при проведении операций на неоднородных продуктивных пластах; проводить оценку возможных осложнений, связанных с пережатием трещины. Полученная информация позволит сформировать рекомендации при проведении реального гидроразрыва пласта. Развитая математическая модель, предложенная в настоящей диссертационной работе, и созданный на ее основе комплекс программ были использованы в филиале Шлюмберже.

Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения, приложения и списка литературы из 281 наименований. Общий объем диссертации составляет 297 страниц. Во введении обоснована актуальность, сформулированы цели и задачи научного исследования. Приведены основные результаты работы, выносимые на защиту, указаны научная новизна и практическая значимость проведенного исследования.

В первой главе сформулирована задача о распространении трещины в пласте, вызванной закачкой вязкой жидкости, выявлены основные механизмы ее развития; приведен краткий обзор классических моделей гидроразрыва; сформулирована концепция трехмерной модели, описывающая движение жидкости, деформацию и разрушение материала; представлены численный метод граничных элементов, используемый для решения уравнений упругого равновесия, алгоритм совместного решения указанных уравнений и уравнений движения жидкости.

Во второй главе предложены неявные глобальные критерии выбора направления и величины приращения фронта трещины, позволяющие описывать ее распространение. Критерий определения величины приращения трещины является неявной формулировкой классического критерия высвобождения упругой энергии. Особенностью предложенной модификации является непосредственный расчет энергии разрушения по параметрам напряженно деформированного состояния (НДС), получаемым после распространения трещины. Предложенный критерий, в отличие от классического, учитывает изменение НДС, вызванное изломом траектории трещины и позволяет более точно предсказывать направление распространения после излома. Проведена верификация предложенных критериев выбора направления и величины приращения трещины путем сравнения с результатами экспериментов и расчетами других авторов. Показано, что неявный глобальный критерий позволяет предсказать распределение угла поворота трещины вдоль фронта лучше, чем другие явные критерии.

В третьей главе предложена и обоснована модель движения жидкости сложной реологии в трещине. Для замыкания уравнений движения используется соотношение Гершеля-Балкли, устанавливающее нелинейную связь между тензором скоростей деформаций и тензором вязких напряжений. Представлен вывод уравнений течения в канале, ширина которого существенно меньше его высоты и длины, проведенный с помощью осреднения трехмерных уравнений движения по ширине трещины на основе явного выражения для профиля скорости. Проведена верификация численного алгоритма решения двумерных уравнений движения в узком канале путем сравнения с аналитическими решениями задач о плоскопараллельном и радиальном течениях жидкости. Показан второй порядок сходимости решения к точному при уменьшении размера сетки. Проведен безразмерный анализ режимов распространения трещины. На его основе продемонстрирована необходимость использования модели Гершеля-Балкли при описании жидкости сложной реологии и невозможность замены ее моделью ньютоновской жидкости.

В четвертой главе исследована трехмерная модель распространения трещины, вызванной закачкой вязкой жидкости. Проведена ее верификация путем сравнения результатов моделирования распространения радиальной трещины с результатами расчета с использованием одномерной модели и аналитическим решением, полученным для режима течения с доминирующей вязкостью. Показано, что при инициации трещины в направлении, не совпадающем с плоскостью действия минимальных напряжений в породе, возникает пережатие канала в окрестности скважины. Для продольной к скважине трещины это пережатие выражено значительно сильнее, чем для поперечной и оказывает существенный эффект на падение давления. Показано, что при моделировании распространения трещины на этапе формирования траектории можно использовать модель ньютоновской жидкости с соответствующей эффективной вязкостью.

В пятой главе описываются трехмерные модели с дополнительными ограничениями, которые позволяют отказаться от критерия выбора направления распространения трещины за счет фиксации формы поверхности, упростить численное решение уравнений упругого равновесия или использовать их аналитические решения. Полученные в результате модели не способны описывать искривление траектории разрыва, что компенсируется снижением требований к вычислительным ресурсам и возможностью описывать эволюцию развитых трещин и протекающие в них процессы, такие

как перенос проппанта. Представленные модели применены для решения нескольких практических задач: выявление условий нарушения гидроизоляции скважины, оценка свойств трещиновато-пористой среды по данным о потерях бурового раствора и определение интервалов изменения параметров гидроразрыва, приводящих к образованию проппантной пробки в различных частях полости трещины.

По работе имеются следующие замечания:

1. В линейной связи между давлением и плотностью (3.35) следует подчеркнуть, является давление избыточным по отношению к атмосферному или пластовому. Формула, возможно, эмпирическая, а пластовое давление не фиксировано?

2. Может ли фронт жидкости догнать фронт трещины, как при этом работает формула (3.41)? Может ли давление между фронтами опуститься ниже порового; насколько это чувствительно для процесса развития трещины? Чем заполнено пространство между фронтами?

3. Не совсем ясно, как работают основные уравнения переноса вещества (5.91) и (5.92) в режиме фильтрации жидкости гидроразрыва через проппантную упаковку (5.96) и (5.97). Согласно формуле под (5.108), скорость протекания в грунт есть функция (5.13), но на стр. 243 сказано, что в данном режиме фильтрация в породе прекращается.

4. В главе 5 при описании движения жидкости гидроразрыва совместно с проппантом сохраняется ньютоновская реология. Можно ли использовать подход с кажущейся вязкостью в рамках модели Гершеля-Балкли? Уместно ли тогда представленное в работе усреднение свойств смеси по поперечной координате?

5. В работе имеются некоторое количество неточностей:

- в формуле (3.1);
- уравнение (3.10) записано некорректно, далее по тексту на стр. 94 «отбрасывание производных по времени в уравнении импульсов ...» в действительности соответствует безинерционному приближению;
- соотношение (3.11) не обосновано, возможно здесь опечатка;
- в формулах (3.37) величина давления поменяла обозначение на заглавную;
- между формулами (5.11) и (5.12) стоит слово на английском языке;
- на стр. 246 «... сделана попытка продолжить описание эволюции трещины путем учета фильтрации проппанта через пробку» – вероятно, имелась ввиду фильтрация жидкости гидроразрыва через проппантную пробку.

Указанные замечания **не снижают** общего положительного впечатления о работе. Автореферат полностью отражает основные положения диссертации. Работа хорошо апробирована и опубликована.

Заключение. Диссертационное исследование Лапина Василия Николаевича «Моделирование распространения трещин, нагруженных давлением вязкой жидкости» является самостоятельным, целостным и завершенным. Полученные автором результаты обоснованы, обладают научной новизной, имеют теоретическую и практическую значимость; вносят существенный вклад в теорию гидроразрыва пласта.

Диссертация соответствует требованиям пункта 9 «Положения о присуждении ученых степеней», а ее автор, Лапин Василий Николаевич, заслуживает присуждения ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 1.2.2. Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ.

Официальный оппонент

доктор физико-математических наук,

(01.02.05 – механика жидкости, газа и плазмы), доцент;

профессор кафедры фундаментальной математики и механики

ФГАОУ ВО «Тюменский государственный университет», г. Тюмень

Россия, 625003, г. Тюмень, ул. Володарского, 6; (3452) 59-77-45,

e-mail: a.v.tatosov@utmn.ru

31.01.2023

Алексей Викторович Татосов

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Тюменский государственный университет», г. Тюмень, <https://www.utmn.ru>

Россия, 625003, г. Тюмень, ул. Володарского, 6; (3452) 59-77-45,

e-mail: a.v.tatosov@utmn.ru

