

Отзыв

официального оппонента д.ф.-м.н. Смирнова Николая Николаевича на диссертационную работу Лапина Василия Николаевича «Моделирование распространения трещин, нагруженных давлением вязкой жидкости», представленную на соискание учёной степени доктора физико-математических наук по специальности 1.2.2 – «математическое моделирование, численные методы и комплексы программ».

Актуальность темы диссертации

В настоящее время добыча газа и нефти редко обходится без применения технологии гидравлического разрыва пласта. Одним из ключевых факторов, влияющих на эффективность этой технологии, является качество моделей процесса, используемых при его проектировании. Современные модели трещин гидравлического разрыва эволюционируют в двух основных направлениях: повышение скорости вычислений для непосредственного практического применения и расширение круга описываемых эффектов для учета их влияния на распространение трещины. Увеличение доступных вычислительных мощностей повышает возможности для развития второго направления, а всё более широкое освоение нетрадиционных коллекторов делает такое развитие необходимым. В диссертационной работе Лапина В.Н. расширение возможностей моделирования процесса гидравлического разрыва проведено путем учета сложной искривленной формы трещины и описания влияния на нее параметров породы и закачиваемой жидкости. Это делает работу, несомненно, актуальной и соответствующей одному из основных направлений развития соответствующей области моделирования.

Структура и содержание работы

Диссертация имеет общий объем 293 страницы и состоит из введения, пяти глав, заключения, приложения и списка литературы, включающего 278 наименований.

Во введении обосновывается актуальность темы диссертационной работы, цели и предмет исследования, перечислены решенные задачи и выносимые на защиту результаты. Следует отметить, что работа в достаточной степени апробирована на большом количестве семинаров в различных научных организациях.

В первой главе сформулирована постановка задачи о распространении трещины под действием закачиваемой в нее жидкости. Здесь же представлена

концепция полной трехмерной модели такой трещины и описаны две ее составляющие: итерационный метод решения всех уравнений модели и метод граничных элементов для уравнений упругого равновесия. Метод совместного решения уравнений модели состоит из нескольких итерационных циклов, вложенных друг в друга таким образом, что более вычислительно сложные операции выполняются меньшее количество раз.

Во второй главе приведен обзор существующих критериев распространения трещин и предлагается новый критерий. Особенность критерия заключается в итерационном поиске той конфигурации фронта трещины, которая удовлетворяет принципу локальной симметрии в каждый момент распространения. Выполнена валидация критерия путем сопоставления с результатами экспериментов и сравнение с результатами, полученными на основе других критериев. Критерий применен для описания распространения трещины, в которой задается постоянное давление.

В третьей главе сформулирована задача о движении жидкости в трещине. Двумерные уравнения движения жидкости получены осреднением уравнений Навье-Стокса и сформулированы в виде, позволяющем описывать движение сложных жидкостей: слабо-сжимаемой и Гершеля-Балкли. Предложен и верифицирован на нескольких простых задачах метод решения этих уравнений, заключающийся в их аппроксимации методом конечных элементов и итерационном процессе для определения кажущейся вязкости жидкости, которая нелинейно зависит от градиента давления. В этой же главе проведен безразмерный анализ, на основе которого сделаны выводы о необходимости учета отставания фронта жидкости от фронта трещины при моделировании трещин малого размера и возможности пренебрежения предельным напряжением сдвига в этом случае.

В четвертой главе описанная в предыдущих главах полная трехмерная модель верифицирована путем сравнения с аналитическим решением и результатами расчета по модели плоской круговой трещины. Проведено моделирование продольной и поперечной трещин от перфорированной скважины, на основе чего исследовано влияние параметров жидкости и породы на форму искривленных трещин. Показан «эффект пережатия» трещины и исследовано влияние параметров задачи на его интенсивность. Результатами численного моделирования подтверждены выводы выполненного в предыдущей главе безразмерного анализа возможности пренебрежения напряжением сдвига и важности учета отставания фронта жидкости.

В пятой главе предложен ряд упрощенных моделей трещин, распространяющихся под действием закачиваемой жидкости, и описано их

применение для решения нескольких практических задач. В частности, модель трещины, распространяющейся вдоль заданной поверхности, применена для описания распространения трещины в скважине с пробкой, а плоско-радиальная модель трещины – для определения параметров трещиновато-пористой среды по утечкам бурового раствора. Также описаны модели плоской трехмерной трещины и модели трещин постоянной высоты, дополненные уравнениями переноса проппанта.

В заключении кратко сформулированы основные результаты диссертации, приведены рекомендации в области разработки численных моделей трещин и их практического применения. Также определены перспективы дальнейшего развития описанных в диссертационной работе моделей.

Научная новизна результатов работы

Новыми являются предложенные в диссертационной работе трехмерная модель искривленной трещины гидравлического разрыва и итерационный алгоритм решения уравнений данной модели. Новыми также являются результаты исследования распространения трещины в ближайшей к скважине области. В частности, ранее в имеющейся литературе оценка длины трещины, необходимой для того, чтобы можно было считать ее плоской, проводилось на основе экспериментальных данных и аналитических соображений, а в диссертационной работе впервые процесс перехода трещины от криволинейного распространения к плоскому описан на основе вычислительного эксперимента. Новыми также являются результаты решения интересных с практической точки зрения задач о распространении трещины в скважине с пробкой и об оценке потерь бурового раствора в породе.

Достоверность полученных результатов,

Автором проведена валидация разработанных моделей и критериев путем сравнения результатов вычислительных экспериментов с экспериментальными данными и результатами, полученными на основе известных, проверенных моделей. Верификация применяемых численных алгоритмов проведена путем сравнения с аналитическими решениями. Это свидетельствует о **достоверности** описанных в диссертации результатов моделирования.

Степень обоснованности научных положений, выводов и рекомендаций

Выводы, заключения и рекомендации сделаны Лапиным В.Н. на основе результатов многочисленных вычислительных экспериментов, их сопоставления с

экспериментальными данными и результатами исследования других авторов, что позволяет говорить об их достаточной **обоснованности**.

Практическая значимость

Гидравлический разрыв пласта – широко используемый метод интенсификации добычи углеводородов. Разработанные модели и численные алгоритмы являются инструментом для описания распространения трещин гидравлического разрыва и могут использоваться для повышения его эффективности и надежности. Результаты проведенного исследования области применимости модели ньютоновской жидкости упрощают выбор моделей для описания различных этапов распространения трещин гидравлического разрыва. О практической значимости свидетельствует также наличие свидетельства о государственной регистрации программы для ЭВМ и акта об использовании результатов работы в технологической компании.

Замечания

1. Хорошо известно, и автор упоминает об этом в тексте работы, что уравнения модели раскрытия трещины гидравлического разрыва относятся к параболическому типу. При этом модель движения жидкости в трещине строится на основе уравнения эллиптического типа. Следует более подробно описать и обосновать предположения, позволившие изменить тип уравнений движения жидкости в трещине.
2. В п. 3.4.3. (стр. 112-114) предлагается использовать модель ньютоновской жидкости вместо реологической модели Гершеля-Балкли. При этом коэффициент в формуле (3.78) методически неправильно назван коэффициентом «вязкости», хотя содержит в себе характеристики не только жидкости, но и породы, а значит не является именно «вязкостью жидкости».
3. Все предложенные модели базируются на предположении об однородности горной породы, тогда как материал породы содержит множество естественных стратификаций. В перспективах дальнейшей работы указана возможность обобщения используемых моделей на случай неоднородного материала, но не очевидно возможно ли такое обобщение.

Приведенные замечания не снижают высокого научного уровня работы, достаточной степени обоснованности, новизны и достоверности основных положений. Диссертация Лапина В.Н. является законченной научно-квалификационной работой, в которой на основании выполненных автором исследований решена научная проблема разработки инструментария для моделирования распространения трещин, которая имеет хозяйственное значение. Автореферат диссертации достаточно полно отражает содержание, основные

результаты и выводы диссертации. Диссертация соответствует требованиям п.п. 9, 10, «Положения о порядке присуждения ученых степеней» (постановление Правительства Российской Федерации от 24 сентября 2013 г. N 842) в части, касающейся ученой степени доктора наук, 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

Заведующий лабораторией волновых процессов

Механико-математического факультета

Федерального государственного бюджетного

образовательного учреждения высшего образования

«Московский государственный университет

имени М.В. Ломоносова»

д.ф.-м.н., профессор

Смирнов Николай Николаевич

 28 февраля 2023 г.

Адрес: 119991 Москва, ГСП-1, Ленинские горы, Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, д.1, Главное здание, механико-математический факультет

Рабочий телефон: +7(495)9391190

Email: mech.math.msu@inbox.ru

Я, Смирнов Николай Николаевич, даю согласие на включение своих персональных данных в документы, связанные с работой диссертационного совета, и их дальнейшую обработку.

Подпись Смирнова Николая Николаевича удостоверяю

Декан механико-математического факультета

«Московского государственного

университета имени М.В. Ломоносова»

член-корр. РАН



А.И. Шафаревич