

Отзыв
официального оппонента на диссертацию
Пестова Дмитрия Александровича
на тему: «Исследование взаимного влияния трещин на направление их
роста в различных условиях нагружения»
по специальности 1.2.2. – «математическое моделирование, численные
методы и комплексы программ» на соискание ученой степени кандидата
физико-математических наук.

Диссертация Пестова Д.А. посвящена разработке эффективного вычислительного метода для моделирования траектории распространения и взаимодействия криволинейных трещин в однородной упругой среде. Важной особенностью построенного алгоритма является учет контакта берегов трещин, требующий решения нелинейной задачи. Разработанный метод применен для решения актуальных прикладных задач, включая взаимодействие открытых трещин в различной конфигурации, а также взаимодействие трещины, находящейся под действием внутреннего давления, с закрытой трещиной.

Актуальность исследования обусловлена необходимостью развития современных технологий, в частности гидроразрыва пласта (ГРП), где требуется точное прогнозирование взаимодействия множественных трещин и их поведения вблизи тектонических разломов. В частности, широкое распространение получила технология многостадийного ГРП для стимуляции притока углеводородов к горизонтальным скважинам в низкопроницаемых пластах. Соответствующая операция требует тщательного планирования с учетом взаимодействия трещин, расстояние между которыми может быть одного порядка (и даже существенно менее) их полудлины. Применяемые в инженерной практике нефтяных и нефтесервисных компаний коммерческие симуляторы основаны, как правило, на упрощенных моделях прямолинейного распространения трещин ГРП, что снижает точность их прогнозов в сложных геомеханических условиях.

Методология и методика исследования.

В основе исследования лежит метод граничных элементов в форме метода разрывных смещений, что позволяет эффективно решать задачи для бесконечных областей с системами трещин. Методика включает:

- Дискретизацию трещин на элементы с постоянными разрывами смещений;
- Использование критерия максимальных растягивающих напряжений для определения направления роста;
- Разработку оригинального алгоритма решения контактных задач;
- Комплексную верификацию численного алгоритма на аналитических решениях и экспериментальных данных.

Степень обоснованности и достоверность научных положений обеспечивается:

- Верификацией на классических задачах, имеющих аналитическое решение (погрешность определения коэффициентов интенсивности напряжений менее 3%);
- Сравнением с экспериментальными данными по росту криволинейных трещин;
- Исследованием устойчивости решения к изменению параметров дискретизации;
- Анализом влияния случайных возмущений на траекторию роста трещин.

Научная новизна работы заключается в:

- Разработке нового эффективного алгоритма решения нелинейной контактной задачи для систем трещин, обладающего пониженной вычислительной сложностью;
- Установлении количественных критериев взаимодействия параллельных трещин и построении карты режимов их траекторий в зависимости от геометрических параметров начальной конфигурации разрывных нарушений;
- Доказательстве устойчивости траекторий трещин к малым и случайным возмущениям;
- Создании комплексной методики параметрического анализа взаимодействия систем трещин.

Теоретическая ценность работы состоит в развитии математического аппарата механики разрушения для задач взаимодействия систем трещин.

Практическая ценность диссертационной работы заключается в следующем:

- Создан эффективный вычислительный инструмент, применимый для моделирования роста криволинейных трещин, который может быть применен для планирования операций ГРП;
- Разработаны инженерные критерии взаимодействия трещин, применимые для проектирования многостадийного гидроразрыва, в том числе, в окрестности тектонических разломов;
- Разработанные алгоритмы могут быть интегрированы в коммерческие симуляторы;
- Полученные результаты определяют границы применимости упрощенных моделей прямолинейного роста трещин в случае их взаимодействия.

По отношению к результатам и выводам диссертации **рекомендуется**:

1. Использовать полученные критерии взаимодействия трещин при проектировании многостадийного ГРП в нефтегазовых и нефтесервисных компаниях;
2. Внедрить разработанные алгоритмы в научно-исследовательские программные комплексы по расчеты распространения взаимодействующих трещин;
3. Использовать разработанную методику при решении задач оценки прочности конструкций с системами трещин.

содержание диссертации состоит из введения, трёх глав и заключения. полный текст диссертации содержит 86 страниц, 2 таблицы, 45 рисунков. Библиографический список литературы содержит 197 пунктов.

Во введении приведён обзор литературы на тему математического моделирования взаимодействия и распространения трещин в упругих средах, включая криволинейные трещины и трещины гидроразрыва пласта. Дана характеристика самой работы, сформулированы актуальность темы исследования, её научная новизна, теоретическая и практическая значимость. Сформулированы положения, выносимые на защиту.

В первой главе приводится формулировка математической модели роста криволинейных трещин в условиях плоской деформации в упругой среде. Решение задачи основано на методе граничных элементов в форме метода разрывных смещений. Приводится дискретизация трещины на взаимодействующие элементы, а направление и возможность их роста при заданных условиях нагружения определяется по критерию максимальных растягивающих напряжений. Проведенная верификация показала высокую точность метода: расхождение с аналитическими решениями <3%. Модель валидирована путем сравнения результатов расчетов с экспериментальными данными. Исследована устойчивость траектории трещины к малым и случайным возмущениям, что показывает применимость метода для неидеальных сред.

Во второй главе с использованием разработанного алгоритма и программного кода проведено систематическое исследование взаимодействия двух и трех изначально параллельных трещин. Введен коэффициент влияния трещин, количественно характеризующий взаимное облегчение или затруднение их роста. Установлены качественно различные сценарии взаимодействия и определено критическое расстояние между трещинами (~0.7-0.75 длины меньшей трещины), при котором происходит смена доминирующего сценария роста. Показано, что учет криволинейности существенен при малых расстояниях между трещинами.

В третьей главе предложен оригинальный и вычислительно эффективный алгоритм решения нелинейной контактной задачи для взаимодействия

трещин, позволяющий учитывать смыкание и проскальзывание их берегов без пересчета полной матрицы системы. С его помощью исследовано взаимодействие активной трещины (аналог трещины ГРП) с параллельной ей пассивной закрытой трещиной (аналог тектонического разлома). Определены зоны сдвига и отрыва в пассивной трещине в зависимости от параметров активной трещины. Введен безразмерный параметр, позволяющий классифицировать характер взаимодействия рассматриваемых трещин: от притяжения и ослабления на малых расстояниях до отталкивания и упрочнения на средних.

Диссертация представляет собой законченное научное исследование, содержащее все необходимые элементы: от постановки задачи и разработки метода до его верификации и решения прикладных задач. Объем и глубина исследования соответствуют требованиям к кандидатским диссертациям.

Список замечаний

1. В силу значительной проработки темы распространения и взаимодействия трещин в упругих средах следовало бы добавить в разделе «Введение» вывод с четкой формулировкой новизны предложенного алгоритма;
2. Математическая формулировка задачи в безразмерном виде, описанная в разделе 1.4, соответствует определению напряженного состояния среды с одной трещиной при использовании силового критерия ее распространения. Далее в работе рассмотрены более сложные постановки, в частности, дополнительные трещины (две и три), энергетический критерий распространения, задача с трещиной, к берегам которой приложена сосредоточенная сила, а также трещина с заданным давлением. Во всех указанных случаях появляются дополнительные размерные параметры, характеризующие физический процесс, и встает вопрос об определении соответствующих безразмерных параметров подобия для полноты параметрического исследования;
3. На Рис. 2.2(б), 2.4(б), 2.6(б) приведена зависимость коэффициентов влияния трещин от их длины L . На всех графиках виден излом кривой в окрестности $L = 0.5$. С чем связан этот излом? Это физическая особенность процесса или недостаточная сходимость численного алгоритма, вызванная завышенным значением длины сегмента трещин?

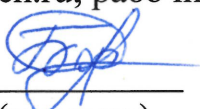
Содержание автореферата полностью соответствует содержанию диссертации.

Заключение

Таким образом, диссертационная работа Пестова Дмитрия Александровича является научно-квалификационной работой, в которой содержится решение задачи разработки эффективных численных методов моделирования роста и

взаимодействия систем трещин, имеющей существенное значение для развития механики разрушения и, в частности, технологий гидроразрыва пласта, а ее автор заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.2.2 – Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ.

Официальный оппонент,
К.ф.-м.н., старший преподаватель,
Сколковский институт науки и технологий
121205, Большой бульвар д.30, стр.1, Москва, Россия
e-mail: s.boronin@skoltech.ru; рабочий телефон: +74952801481 доб. 3365



(подпись)

/_Боронин С.А._/
(расшифровка подписи)

Дата *21.11.2025* Гербовая печать

Подпись Боронина С.А. недействительна.

РУКОВОДИТЕЛЬ ОТДЕЛА
КАДРОВОГО АДМИНИСТРИРОВАНИЯ
Гук О.С.

