

## **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**

Диссертационная работа Пестов Дмитрия Александровича посвящена математическому моделированию развития трещин в упругой среде с учетом их взаимодействия и возможностью контакта боковых поверхностей трещин.

**Актуальность темы работы** обусловлена тем, что задачи прогнозного моделирования роста и взаимодействия трещин являются фундаментальными для механики разрушения и имеют первостепенное прикладное значение в таких областях как механика конструкционных материалов, включая оценку прочности конструкций и деталей машин; методы увеличения нефтеотдачи, в частности, гидравлический разрыв пласта – ГРП; материаловедение. Несмотря на то, что задача анализа развития трещин является классической для механики, большинство известных результатов касаются уединенных и статических трещин и их систем. Задачи о взаимном влиянии растущих криволинейных трещин, особенно в условиях сжимающих нагрузок и контактного взаимодействия их берегов, остаются слабо изученными ввиду своей вычислительной сложности и нелинейности. Рассматриваемая работа направлена на решение именно этих актуальных проблем, что предопределяет ее научную и практическую значимость.

**Общая методология и методика исследования.** В основе работы лежит математическая модель, основанная на пространственно-двумерной задаче теории упругости в приближении плоской деформации.

В качестве основного численного метода избран метод граничных элементов, а именно его модификация, известная как метод разрывных смещений. Автором предложено его существенное развитие: разработан оригинальный итерационный алгоритм решения нелинейной контактной задачи, позволяющий избежать повторного вычисления полной матрицы коэффициентов конечномерной задачи на каждой итерации метода. Это позволяет снизить вычислительную сложность задачи с  $O(N^3)$  до  $O(k^3)$ , где  $k \ll N$ . Разработанный алгоритм реализован в виде программного комплекса. В рамках работы выполнена его верификация и валидация путем сравнения с аналитическими решениями и экспериментальными данными.

**Достоверность** результатов обеспечена использованием обоснованных методов механики сплошной среды и вычислительной математики, корректной математической постановкой задачи, использованием апробированного в механике разрушения критерия роста трещин, всесторонней валидацией и верификацией вычислительного алгоритма. Автором продемонстрировано хорошее (в ряде случаев не превышающее единиц процентов) совпадение результатов моделирования с известными аналитическими решениями для задач с одной и двумя трещинами, а также с экспериментальными данными. Исследование устойчивости решения по отношению к размеру граничного элемента подтверждает надежность полученных результатов моделирования и общую робастность алгоритма и его программной реализации. Выводы и рекомендации, сформулированные в диссертации, логически вытекают из проведенного анализа и надежно подтверждаются результатами численных экспериментов.

**Научная новизна работы** заключается в следующем:

1. Предложен новый метод моделирования роста криволинейных трещин, учитывающий их взаимное влияние и возможность смыкания берегов под действием сжимающих напряжений.

2. Разработан и программно реализован эффективный алгоритм решения контактной задачи для систем трещин, не требующий полного пересчета матрицы коэффициентов на каждой итерации.
3. На основе созданного комплекса программ впервые проведено систематическое численное исследование взаимодействия растущих криволинейных трещин, результатом которого стали качественные и количественные критерии их взаимодействия.
4. Впервые на основе численного моделирования показана и исследована устойчивость траектории трещины к малым и случайным возмущениям, что имеет существенное значение для оценки применимости детерминистических моделей в неидеальных средах.
5. Определены критические расстояния между трещинами, разделяющие качественно различные сценарии их взаимодействия, а также получен безразмерный критерий для оценки влияния трещины гидроразрыва на активацию естественного разлома.

**Теоретическая ценность** работы заключается в развитии математического аппарата механики разрушения. Разработанные методы и алгоритмы могут быть использованы для решения широкого класса контактных задач в теории трещин. Показанная устойчивость траекторий открывает новые возможности для моделирования роста трещин в неоднородных материалах.

**Практическая ценность** работы состоит в получении конкретных инженерных критериев. Определены условия, в зависимости от которых необходимо применение ресурсоемких моделей криволинейного роста или можно ограничиться более простыми. Результаты по взаимодействию трещины ГРП с разломом могут быть применены для проектирования и оптимизации процессов многостадийного гидроразрыва пласта в нефтегазовой отрасли, позволяя прогнозировать риски нежелательной активации природных нарушений сплошности коллектора.

Результаты работы могут быть использованы:

- при разработке и верификации коммерческих и научных симуляторов ГРП (псевдо-трехмерных и плоско-трехмерных) для учета взаимодействия трещин и активации разломов;
- в учебном процессе при подготовке специалистов в области механики сплошных сред, вычислительной математики и нефтегазового инжиниринга;
- для дальнейших фундаментальных исследований, например, при переходе к трехмерным постановкам или учете более сложных реологических свойств материала.

### **Общая оценка содержания диссертации и ее завершенность.**

Диссертация представляет собой законченное, целостное научное исследование. Изложение работы хорошо и четко структурировано. Все поставленные цели работы достигнуты. Логика изложения последовательна: от постановки задачи и разработки метода к его верификации и применению для решения актуальных научно-практических проблем. Работа выполнена на высоком научном уровне.

Автореферат адекватно и полно отражает основное содержание диссертационной работы, ее основные положения, выводы и результаты.

### **По недостаткам в содержании и оформлении диссертации соискателя можно сделать следующие замечания:**

1. Верификация предложенного автором работы метода моделирования трещин проведена с использованием классических задач (одиночная трещина, две параллельные трещины), для которых известны аналитические решения. Для дополнительного подтверждения достоверности уместно было бы провести сравнения результатов моделирования с результатами применения других численных методов (например, МКЭ с адаптацией сетки) для более сложных конфигураций трещин (например, для системы из трех и более криволинейных трещин).

2. В задаче о взаимодействии трещины ГРП с разломом давление в трещине ГРП предполагается постоянным или задается по упрощенному закону. Более реалистичным приближением является использование математических моделей, учитывающих течение в трещине в рамках модели смазочного слоя. Автор отмечает это упрощение, но его последствия для практической применимости критериев могли бы быть раскрыты глубже.
3. В разделе, посвященном алгоритму учета контактных условий на боковых поверхностях трещины, описание алгоритма является достаточно сложным для восприятия. Возможно, для лучшего понимания следовало привести более подробный псевдокод или блок-схему ключевых этапов, вынесенную в основной текст, а не только общую схему алгоритма.
4. Хотя автор заявляет о существенном снижении вычислительной сложности, количественная оценка этого снижения (сравнение времени счета или числа итераций для стандартного и предложенного метода на одной и той же задаче) представлена недостаточно явно. Приведение таких данных усилило бы аргументацию и качество представления результатов исследования.

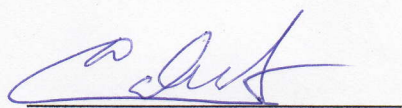
Приведенные замечания относятся, в основном, к представлению материала на страницах диссертации и не отменяют общего положительного впечатления о работе.

Таким образом, диссертация Пестова Дмитрия Александровича является научно-квалификационной работой, в которой содержится решение задачи математического моделирования роста и взаимодействия систем трещин, имеющей важное значение для развития механики разрушения и вычислительной механики, а также для решения прикладных задач в нефтегазовой отрасли. Полученные результаты характеризуются научной новизной и практической значимостью. Диссертация соответствует критериям, установленным п. 9 «Положения о порядке присуждения ученых степеней», утвержденного постановлением Правительства Российской Федерации от 24.09.2013 г. № 842, а ее автор

Пестов Дмитрий Александрович заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.2.2 – математическое моделирование, численные методы и комплексы программ.

Официальный оппонент,

д.ф.-м.н., член-корр. РАН, заместитель директора по научной работе, Федеральное государственное учреждение «Федеральный исследовательский центр Институт прикладной математики им. М.В. Келдыша Российской академии наук», Москва, 125047, Миусская пл., д. 4, тел.: +7 (499) 978-13-14, эл. почта: e.savenkov@gmail.com.



Е. Б. Савенков

17.11.2025

Подпись Е. Б. Савенкова удостоверяю.

Ученый секретарь

ИПМ им. М. В. Келдыша РАН

к.ф.-м.н.



А. А. Давыдов