

МИНОБРНАУКИ РОССИИ  
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ  
НАУКИ ИНСТИТУТ ПРОБЛЕМ МАШИНОВЕДЕНИЯ РОССИЙСКОЙ  
АКАДЕМИИ НАУК  
(ИПМаш РАН)

В.О., Большой проспект, д.61, Санкт-Петербург, 199178  
Тел.: (812)-321-4778; факс: (812)-321-4771; [www.ipme.ru](http://www.ipme.ru)

ОГРН 1037800003560, ИНН/КПП 7801037069/780101001



Исх.№ 125.10/218 от 30.10. 2025 г.

«УТВЕРЖДАЮ»  
Директор ФГБУН «ИПМаш РАН»  
Д.Т.Н.  
В.А. Полянский  
«  » 2025г.



### ОТЗЫВ ВЕДУШЕЙ ОРГАНИЗАЦИИ

Федерального государственного бюджетного учреждения науки  
«Институт проблем машиноведения Российской академии наук» (ИПМаш РАН)  
о диссертационной работе Пестова Дмитрия Александровича  
«Исследование взаимного влияния трещин на направление их роста в  
различных условиях нагружения», представленной на соискание учёной  
степени кандидата наук по специальности 1.2.2. – «Математическое  
моделирование, численные методы и комплексы программ»

#### **Актуальность и степень разработанности темы исследования.**

Диссертационная работа Пестова Д.А. посвящена развитию методов моделирования криволинейного роста трещин в упругой среде. Целью работы является оценка необходимости применения моделей криволинейного роста в задачах взаимодействия растущих трещин. Актуальность подобного исследования обусловлена востребованностью высокоточного моделирования процесса роста трещин в задачах гидроразрыва. С другой стороны, большая часть коммерческих программных комплексов, используемых для такого моделирования, созданы в рамках моделей прямолинейного роста трещин и не учитывают влияния трещин или иных неоднородностей на траекторию роста трещины. Это связано с высокой вычислительной сложностью,

нелинейностью граничных условий (в частности, при смыкании берегов трещин под сжимающими напряжениями) и многофакторной зависимостью траектории роста от геометрии системы, типа нагружения и свойств материала. В условиях многостадийного гидроразрыва, например, активная трещина может взаимодействовать как с другими искусственными трещинами, так и с природными разломами, что существенно влияет на эффективность добычи углеводородов. Аналогичные эффекты наблюдаются в композитах, бетоне и других неоднородных средах, где наличие дефектов и микротрещин определяет общую прочность конструкции. В связи с этим разработка и применение эффективных численных методов, способных учитывать криволинейный рост трещин, их взаимное влияние и контактное взаимодействие берегов, представляет собой важную научную и практическую задачу. Предложенный в диссертации модифицированный метод разрывных смещений позволяет существенно снизить вычислительные затраты за счёт использования фундаментальных решений теории упругости и корректного учёта нелинейных контактных условий без полного пересчёта матрицы системы. Полученные в работе критерии необходимости применения моделей криволинейного роста, оценки коэффициентов влияния и безразмерных параметров взаимодействия обеспечивают теоретическую основу для повышения точности прогнозирования поведения трещин в реальных условиях, что подтверждает высокую актуальность проведённого исследования.

**Научная новизна исследования** заключается в следующем:

1. Разработан новый метод решения нелинейной задачи роста трещин с учетом частичного смыкания берегов, имеющий малую вычислительную сложность.
2. Получены критерии взаимодействия изначально параллельных растущих трещин в плоской постановке. Также получены новые оценки необходимости применения моделей криволинейного роста трещин при их взаимодействии.
3. С использованием разработанного метода впервые показана устойчивость траектории трещины нормального отрыва к малым отклонениям и дефектам среды, а также изучено влияние случайных отклонений на траекторию роста трещины.

**Теоретическая и практическая значимость.**

В работе представлена модель на основе метода разрывных смещений, позволяющая эффективно моделировать рост и взаимодействие

криволинейных трещин, в том числе в случае частичного контакта берегов. Низкая вычислительная сложность модели открывает широкие перспективы для ее практического применения. В частности, полученные критерии взаимодействия растущих трещин в плоскости могут быть применены на практике при проектировании и расчете гидроразрыва пласта после уточнения полученных выводов в трехмерной постановке.

Результаты, представленные в диссертации, могут быть использованы в российских научных и образовательных учреждениях, ведущих исследования и разработки в области численного моделирования гидроразрыва, в частности в моделях множественного гидроразрыва, развиваемых компаниями ПАО Роснефть и ПАО Газпром нефть.

### **Достоверность и обоснованность.**

Достоверность результатов достигается за счет использования точных решений теории упругости. Сравнение результатов с аналитическими решениями позволяет оценить границы применимости разработанного метода. Сравнение с экспериментальными данными показывает точное предсказание траектории растущей трещины в материалах, для которых применим выбранный критерий поворота трещины. Проведенный анализ влияния малых отклонений на траекторию трещины позволяет расширить область применимости разработанных методов на неоднородные среды.

### **Соответствие паспорту специальности.**

Работа полностью соответствует паспорту заявленной научной специальности 1.2.2. – «Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ».

### **Апробация.**

Материалы диссертации докладывались на шести российских и международных конференциях, а также на научно-исследовательских семинарах в МГУ им. М.В. Ломоносова, Сколковском институте науки и технологий, Санкт-Петербургском политехническом университете Петра Великого и Институте прикладной математики им. М.В. Келдыша. По теме диссертации опубликовано 5 работ в изданиях из перечня журналов, рекомендованных ВАК РФ, из которых 2 работы – в рецензируемых изданиях, включенных в системы цитирования Web of Science и Scopus. Отдельно можно отметить, что одна из работ опубликована без соавторов.

## **Содержание диссертации.**

Диссертация состоит из введения, трёх глав, заключения и списка литературы. Объём диссертации составляет 86 страниц, включая 45 рисунков, 2 таблицы и список использованной литературы из 192 работ.

Во введении обосновывается актуальность, теоретическая и практическая значимость, а также научная новизна работы, формулируются её цели и положения, выносимые на защиту, а также приводится обзор работ, включающий в себя историческую справку о развитии механики трещин, обзор критериев поворота трещин и численных методов решения задач с трещинами. Также представлен достаточно полный обзор моделей и методов, применяемых для моделирования роста трещин гидроразрыва, и показана область возможной применимости результатов данного исследования.

В первой главе формулируется постановка задачи роста криволинейных трещин в упругой среде в условиях состояния плоской деформации. Приводится метод решения данной задачи, основанный на методе разрывных смещений и модели квазистатического роста трещин в направлении, определяемом согласно критерию наибольших растягивающих напряжений. Проведена верификация численного метода путем сравнения с аналитическими решениями для статических задач с трещинами, а также валидация путем сравнения с экспериментально полученными траекториями роста криволинейной трещины в образце из оргстекла под действием сдвиговых напряжений. Также в первой главе проведено исследование зависимости численно предсказываемой траектории роста трещины в зависимости от размера сетки, а также от возмущений, вносимых в направление роста.

Во второй главе с использованием разработанной модели исследована задача взаимодействия нескольких растущих трещин, изначально расположенных параллельно друг другу. Получены геометрические критерии характера взаимодействия трещин в зависимости от их начального расположения. Сделаны выводы по условиям, в которых использование моделей прямолинейного роста трещин может не обеспечивать достаточную точность ввиду существенного влияния трещин на траекторию друг друга.

В третьей главе представлен метод решения задачи роста трещин в условиях возможного контакта берегов трещин. Разработанный автором метод основан на итерационном методе последовательных приближений но, в отличие от него, имеет меньшую вычислительную сложность в случае, если количество контактных элементов мало по сравнению с общим количеством граничных элементов в системе трещин. Также с использованием данного метода рассмотрено решение задачи взаимодействия трещины, растущей под

действием внутреннего давления с параллельной ей трещиной, закрытой под действием внешних сжимающих напряжений.

В заключении сформулированы основные результаты работы.

**Оформление диссертации.** Диссертация оформлена в соответствии с требованиями ВАК, предъявляемым к кандидатским диссертациям (ГОСТ Р 7.0.11-2011). Структура диссертации выстроена логично и последовательно. Работа написана грамотным научным языком.

**Автореферат** соответствует установленным требованиям и полностью отражает основное содержание диссертации.

#### **Замечания по содержанию.**

1. В разделе 2.2 (стр. 50–56) рассматривается система из трех трещин, но не обсуждается возможность возникновения несимметричных сценариев при малых нарушениях симметрии начальной конфигурации. Устойчивы ли полученные сценарии (рост крайних/центральной трещины) к малым случайным возмущениям начального расположения или неоднородностям материала?
2. В разделе 3.2.3 (стр. 69–70) показано, что при определенных расстояниях активная трещина может «притягиваться» к пассивной, но не рассмотрен вопрос о возможном слиянии трещин. Исследовались ли условия, при которых происходит объединение активной и пассивной трещин?
3. В работе рассматривалось распространение и взаимное влияние трещин в двумерной постановке. Насколько на практике, например, при моделировании многостадийного гидроразрыва пласта, важно учитывать трехмерные эффекты?
4. Выбранные в работе обозначения основных величин не оптимальны. В частности, буквой  $G$  в одних формулах обозначается модуль сдвига, а в других – скорость высвобождения упругой энергии.

Данные замечания имеют частный характер и не влияют на общее положительное впечатление от работы.

#### **Заключение.**

Диссертационная работа Пестова Дмитрия Александровича является законченной научно-квалификационной работой, в которой содержится решение актуальной задачи уменьшения вычислительной сложности численного решения в задачах взаимодействия трещин в условиях возможного

контакта берегов трещин, характерных для приложений, связанных с вопросами гидроразрыва при добыче нефти и газа. Работа Пестова Д.А. соответствует требованиям п.9 «Положения о порядке присуждения ученых степеней», утвержденного постановлением Правительства Российской Федерации от 24.09.2013г. №842, предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук, а её автор Пестов Д.А. заслуживает присуждения учёной степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.2.2. – «Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ».

Отзыв рассмотрен и одобрен на заседании лаборатории «Дискретные модели механики» 15 октября 2025 года (протокол № 1 от 15.10.2025).

Заведующий лабораторией  
«Дискретные модели  
механики», доктор физико-  
математических наук, член-  
корреспондент РАН



/ Кривцов Антон Мирославович

Отзыв составил:  
ведущий научный сотрудник,  
доктор физико-  
математических наук



/ Кузькин Виталий Андреевич

**Сведения об организации:**

Наименование организации: Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт проблем машиноведения Российской академии наук (ИПМаш РАН)

Адрес: 199178, г. Санкт-Петербург, Большой пр. ВО, д. 61

Тел.: +7-812- 321-47-78

Факс: +7 (812) 321-47-71.

Сайт: <https://ipme.ru>

E-mail: [ipmash@ipme.ru](mailto:ipmash@ipme.ru)