

ЗАКЛЮЧЕНИЕ ДИССЕРТАЦИОННОГО СОВЕТА 24.1.237.01,
СОЗДАННОГО НА БАЗЕ
ФЕДЕРАЛЬНОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО УЧРЕЖДЕНИЯ
«ФЕДЕРАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ЦЕНТР ИНСТИТУТ
ПРИКЛАДНОЙ МАТЕМАТИКИ ИМ. М.В. КЕЛДЫША РАН»
МИНИСТЕРСТВА НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
ПО ДИССЕРТАЦИИ НА СОИСКАНИЕ
УЧЕНОЙ СТЕПЕНИ КАНДИДАТА НАУК

аттестационное дело № _____
решение диссертационного совета от 11.12.2025 № 7

О присуждении Пестову Дмитрию Александровичу, гражданину Российской Федерации, ученой степени кандидата физико-математических наук.

Диссертация «Исследование взаимного влияния трещин на направление их роста в различных условиях нагружения» по специальности 1.2.2 – «Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ» принята к защите 02.10.2025 (протокол заседания №7/пз) диссертационным советом 24.1.237.01, созданным на базе Федерального государственного учреждения «Федеральный исследовательский центр Институт прикладной математики им. М. В. Келдыша Российской академии наук» (ИПМ им. М.В. Келдыша РАН), 125047, Москва, Миусская пл., д. 4. Диссертационный совет утвержден приказом Минобрнауки №105/нк от 11 апреля 2012 года.

Соискатель **Пестов Дмитрий Александрович**, 28.04.1994 г.р., в 2015 г. окончил Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова» по специальности «Механика» с присвоением квалификации «Механик». В 2019 г. соискатель окончил очную аспирантуру Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова» по направлению 01.02.05.- Механика

жидкости, газа и плазмы, сдал кандидатские экзамены. В 2025 г. дополнительно сдал кандидатский экзамен по специальности 1.2.2. – «Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ». С 2016 г. соискатель работает в отделе вычислительных систем НИЦ «Курчатовский институт» – НИИСИ в должности младшего научного сотрудника.

Диссертация выполнена в отделе вычислительных систем Федерального государственного автономного учреждения «Федеральный научный центр Научно-исследовательский институт системных исследований» НИЦ «Курчатовский институт».

Научный руководитель **Смирнов Николай Николаевич**, доктор физико-математических наук, профессор, заместитель заведующего отделением фундаментальных и прикладных исследований НИЦ «Курчатовский институт» – НИИСИ.

Официальные оппоненты:

Савенков Евгений Борисович, доктор физико-математических наук, член-корреспондент РАН, заместитель директора по научной работе Федерального государственного учреждения «Федеральный исследовательский центр Институт прикладной математики им. М.В. Келдыша Российской академии наук»,

Боронин Сергей Андреевич, кандидат физико-математических наук, старший преподаватель проектного центра по энергопереходу Автономной некоммерческой образовательной организации высшего образования «Сколковский институт науки и технологий»

дали **положительные** отзывы на диссертацию.

Ведущая организация Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт проблем машиноведения Российской академии наук (ИПМаш РАН, г. Санкт-Петербург) в своем положительном отзыве, подписанном заведующим лабораторией «Дискретные модели механики», д.ф.-м.н., член-корр. РАН Кривцовым А.М., указала, что работа

представляет собой законченное научное исследование, 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.

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.

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».

Соискатель имеет более 20 опубликованных работ. По теме диссертации опубликовано 5 работ, из них 3 в рецензируемых научных изданиях, рекомендованных ВАК, и 2 – в журналах, индексируемых с международных базах данных Scopus и Web of Science. 1 работа выполнена без соавторов:

1. *Пестов Д. А.* Оценка применимости метода разрывных смещений в задачах роста и взаимодействия криволинейных трещин // *Успехи кибернетики.* — 2025. — Т. 6, № 1. — С. 94–103. (ВАК)

2. *Пестов Д. А., Акулич А. В., Звягин А. В. и др.* Фундаментальные аспекты численного моделирования трещины гидроразрыва // *Вестник кибернетики*. — 2018. — Т. 32, № 4. **(ВАК)**
3. *Пестов Д.А., Смирнов Н.Н., Акулич А.В., Тюренкова В.В.* Математическое моделирование задачи распространения трещины гидроразрыва // *Вестник кибернетики*. — 2017. — Т. 25, № 1. — С. 80–92. **(ВАК)**
4. *Pestov D. A., Shamina A. A., Zvyagin A. V.* Investigation of the interaction of rectangular cracks by new numerical simulation methods // *Acta Astronautica*. — 2023. — Vol. 204. — P. 878–887. **(Scopus Q1)**
5. *Smirnov N.N., Li K., Skryleva E.I., Pestov D.A. et al.* Mathematical modeling of hydraulic fracture formation and cleaning processes // *Energies*. — 2022. — Vol. 15. — P. 1967. **(Scopus Q1)**

В персональной работе [1] описана используемая в диссертации модель и представлены результаты влияния малых возмущений начальной траектории на рост криволинейной трещины. В работах [2-3] соискателем исследовано взаимодействие трещины гидроразрыва с неоднородностями среды, предложена модель поворота трещины. В работе [4] соискателем проведено исследование взаимодействия растущих трещин в плоской постановке и их взаимного влияния на траекторию и возможность роста, соавторами проведены данные исследования для статических трёхмерных трещин. В работе [5] соискателем разработаны алгоритмы, ускоряющие сходимость численного метода при моделировании роста плоско-трехмерной трещины в условиях неоднородной трещиностойкости, а также методы моделирования распространения фронта трещины.

Научные публикации отражают основные результаты диссертационной работы. Сведения об опубликованных соискателем работах достоверны.

Общий объем публикаций составляет – 4,68 печ.л., объем авторского вклада – 2, 13 печ.л.

На диссертацию поступили отзывы ведущей организации и оппонентов, а также один отзыв на автореферат. Все отзывы положительные. В отзывах содержится ряд замечаний:

В отзыве официального оппонента д.ф.-м.н., чл.-корр. РАН Е.Б.

Савенкова:

- 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.

В отзыве официального оппонента к.ф.-м.н. С.А. Боронина:

- 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 её 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 ставит 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?*

В отзыве ведущей организации (ИПМаш РАН):

- 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.

Отзыв на автореферат от **Каневской Регины Дмитриевны**, д.т.н., профессора, заведующей кафедрой Прикладной математики и компьютерного моделирования Федерального государственного бюджетного учреждения высшего образования «Российский государственный университет нефти и газа (национальный исследовательский университет) имени И.М.Губкина» содержит следующие замечания:

1. Представляется не совсем корректным рассуждение о скорости роста трещин при решении стационарной задачи. Скорее речь идёт о последовательности разрушений или одновременности роста трещин.
2. Следовало бы избежать ненужной путаницы при использовании одинакового обозначения G для модуля сдвига и функции, описывающей возможность роста трещины.
3. Интересно было бы рассмотреть возможность учета неоднородности среды (наличие включений большого масштаба) и её влияния на распространение трещин.

Отзыв на автореферат от **Лапина Владимира Николаевича**, д.ф-м.н., профессора кафедры математического моделирования Механико-математического факультета Федерального государственного автономного учреждения высшего образования «Новосибирский национальный исследовательский государственный университет» содержит следующие замечания:

- 1. На рис. 1 на примере траектории трещины продемонстрирована сходимость численного решения задачи о распространении наклонной трещины. Но не раскрыт важный для большинства специалистов по численным методам вопрос – каким порядком характеризуется эта сходимость? Там же на стр. 9 сказано «точное (менее 1% погрешности) определение коэффициентов интенсивности» Опять же не указано, как меняется погрешность при сгущении сетки, и можно ли ожидать высокого порядка сходимости, учитывая наличие особенности поля напряжений у кончика трещины.*
- 2. Низкая вычислительная стоимость методов, основанных на двумерных постановках задач о трещинах, очевидна, и выбор такой постановки вполне естественен. Но в автореферате не прозвучало четко оценки ограничений используемых постановок и возможных погрешностей при описании взаимодействия реальных трещин, которые могут быть существенно трехмерны. О необходимости корректировки двумерной постановки говорится, например, в работе Kresse O. et al. Numerical Modeling of Hydraulic Fractures Interaction in Complex Naturally Fractured Formations 2013 г.*

На все вопросы и замечания в ходе защиты соискатель дал исчерпывающие ответы.

Выбор официальных оппонентов и ведущей организации обосновывается их широкой известностью и высоким уровнем научной компетентности в области математического моделирования, численных

методов, а также механики разрушения, в частности связанной с задачами гидроразрыва, что подтверждается публикациями оппонентов и сотрудников ведущей организации.

Диссертационный совет отмечает, что на основании выполненных соискателем исследований:

1. **Разработан** новый эффективный метод моделирования роста криволинейных трещин в упругой среде на основе модифицированного метода разрывных смещений, учитывающий взаимное влияние трещин и возможность контакта их берегов.
2. **Предложен** оригинальный итерационный алгоритм решения нелинейной контактной задачи для систем трещин, позволяющий многократно снизить вычислительную сложность.
3. Впервые **проведено** систематическое численное исследование взаимодействия растущих криволинейных трещин между собой, установлены качественные и количественные критерии их взаимодействия, определены критические расстояния между трещинами ($\sim 0.7-0.75$ длины меньшей трещины), разделяющие различные сценарии роста.
4. **Показана** устойчивость траектории трещины к малым и случайным возмущениям, что обосновывает применимость детерминистических моделей в неидеальных средах.
5. **Получен** безразмерный критерий для оценки влияния трещины гидроразрыва на активацию естественного разлома, имеющий практическое значение для проектирования многостадийного гидроразрыва пласта.

Теоретическая значимость исследования заключается в развитии математического аппарата механики разрушения для задач взаимодействия систем трещин с учётом контактных условий. Разработанные методы и

алгоритмы вносят значительный вклад в численное моделирование задач, связанных с взаимодействием трещин в условиях сложного нагружения.

Практическая значимость состоит в создании эффективного вычислительного инструмента и получении конкретных инженерных критериев для оценки необходимости применения моделей криволинейного роста трещин. Результаты работы могут быть использованы при разработке и верификации симуляторов гидроразрыва пласта (ГРП), в учебном процессе и для дальнейших фундаментальных исследований.

Достоверность и обоснованность результатов обеспечена корректной математической постановкой задач, использованием проверенных методов вычислительной математики и механики сплошной среды, верификацией и валидацией разработанных алгоритмов путём сравнения с аналитическими решениями и экспериментальными данными (погрешность определения коэффициентов интенсивности напряжений менее 3%, а также точное совпадение траекторий).

Личный вклад соискателя. Все результаты, выносимые на защиту, получены лично Пестовым Д.А. Им самостоятельно разработаны математическая модель, алгоритмы и программный комплекс, проведены численные эксперименты, анализ и интерпретация результатов, подготовлены публикации.

Во время защиты диссертации принципиальных замечаний высказано не было. Соискатель аргументированно ответил на заданные ему в ходе заседания вопросы, а также на вопросы и замечания, содержащиеся в отзывах на диссертацию и автореферат диссертации. Все ответы соискателя и выступления участников заседания представлены в стенограмме заседания.

На заседании 11 декабря 2025 года диссертационный совет пришел к выводу о том, что диссертация представляет собой законченную научно-квалификационную работу, которая соответствует критериям установленным Положением о присуждении учёных степеней, утвержденным

Постановлением Правительства Российской Федерации №842 от 24 сентября 2013 г., и принял решение присудить Пестову Дмитрию Александровичу ученую степень кандидата физико-математических наук по специальности 1.2.2 – «Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ» за решение научной задачи, имеющей значение для развития математического моделирования и вычислительной механики, а именно разработку эффективных численных методов моделирования роста и взаимодействия систем криволинейных трещин с учётом контактных условий.

При проведении тайного голосования диссертационный совет в количестве 20 человек, из них 7 докторов наук по специальности, соответствующей рассматриваемой диссертации, участвовавших в заседании, из 24 человек, входящих в состав совета, проголосовали: за 20, против - нет, недействительных бюллетеней - нет .

Председатель

диссертационного совета 24.1.237.01



Четверушкин Борис Николаевич

Ученый секретарь

диссертационного совета 24.1.237.01

Корнилина Марина Андреевна

11.12.2025 г.