



**МОСКОВСКИЙ
ГОСУДАРСТВЕННЫЙ
УНИВЕРСИТЕТ
имени М.В.ЛОМОНОСОВА
(МГУ)**

Ленинские горы, Москва,
ГСП-1, 119991
Телефон: 8-495-939-10-00
Факс: 8-495-939-01-26

26.02.2022 № 30-80/013-03
На № _____

«УТВЕРЖДАЮ»

Проректор ФГБОУ ВО «Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова»

Федягин Андрей Анатольевич



2022 г.

ОТЗЫВ

ведущей организации на диссертацию **Куранакова Дмитрия Сергеевича** на тему: «**Методы граничных элементов и критерии разрушения в трехмерных задачах зарождения и распространения трещин**», представленную на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.2.2 – математическое моделирование, численные методы и комплексы программ.

Диссертация состоит из введения, трех глав, заключения, списка цитируемой литературы и приложения. Диссертация изложена на 146 страницах машинописного текста, включая 66 иллюстраций и 2 таблицы. Список цитируемой литературы содержит 142 наименования.

Во введении проведено обоснование актуальности и практической значимости рассматриваемых в диссертации задач. Сформулированы основные цели исследования:

1. Разработать модификации метода граничных элементов, пригодные для решения трехмерных задач с полостями и трещинами.
2. Разработать критерии разрушения, учитывающие эффект размера в трехмерных задачах зарождения трещины.
3. Провести валидацию предложенных критериев на экспериментах по разрушению образцов из бетона и из горной породы различной формы и размеров: блоков с цилиндрическими отверстиями, с боковыми вырезами, скважин с поперечными пропилами.
4. На основе разработанных моделей создать программное обеспечение для решения трехмерных задач зарождения трещины и для вычисления напряженно-деформированного состояния (НДС) материала и коэффициентов интенсив-

ности напряжений (КИНов) в задачах деформации трехмерных тел с полостями и трещинами.

5. С помощью разработанного программного обеспечения установить местоположение зародышевой трещины и давление жидкости, необходимого для зарождения трещины, в зависимости от ориентации скважины и перфорации относительно напряжений залегания на примере конкретного нефтегазового месторождения.

Перечисленные вопросы ранее не исследовались и составляют научную новизну представляемой к защите работы.

Достоверность и обоснованность полученных результатов обеспечивается использованием фундаментальных законов механики твердого тела, механики разрушения и выбором теоретически обоснованных численных методов, а также подтверждается согласованием результатов проведенных расчетов с известными аналитическими решениями и экспериментальными данными.

Практическая ценность диссертационной работы заключается в возможности применения ее результатов (методик, алгоритмов, их программной реализации и результатов расчетов) в ряде прикладных областей нефтегазовой промышленности и горного дела.

В первой главе представлена дифференциальная постановка задачи упругого равновесия внутренней и внешней областей с полостями и трещинами. Произведен обзор существующих численных методов для ее решения: метода конечных элементов (МКЭ) и граничных элементов (МГЭ).

Во второй главе рассмотрена трехмерная задача зарождения трещины от поверхности упругого тела. Задача состоит в определении нагрузки, которую необходимо приложить к упругому телу для его разрушения, а также в определении местоположения и ориентации зародившейся трещины. Выходными данными задачи являются построенные зародышевые трещины, которые являются входными данными для модели дальнейшего распространения трещины вглубь материала. Показаны примеры построенных зародышевых трещин от скважины с поперечными пропилами. Задача зарождения включает в себя подзадачу вычисления НДС нагруженного тела при различных приложенных нагрузках и критерий трещинообразования.

В диссертационной работе для моделирования процесса разрушения горных пород разработано два трехмерных критерия разрушения. Оба критерия описывают зависимость прочности материала от размера разрушающего образца. Проведена валидация предложенных критериев разрушения сравнением с экспериментами по разрушению блоков с цилиндрическими отверстиями.

В третьей главе рассмотрена задача зарождения трещины от перфориро-

ванной скважины в бесконечном массиве породы. Порода в естественном залегании находится под нагрузкой, характеризуемой тензором напряжений. Скважина имеет цилиндрическую форму. Она может располагаться под произвольным углом наклона к горизонту. В скважину может быть помещена стальная обсадная колонна. Пространство между стальной колонной и стенками скважины заполнено бетоном. В данной главе сформулирована постановка задачи зарождения трещины от перфорированной скважины в горной породе, найдено ее решение и проведен анализ чувствительности решения задачи к основным параметрам. Для вертикальной и горизонтальной скважин исследовано влияние эффекта размера на сценарии зарождения трещин. Проведен анализ влияния всевозможных ориентаций скважины и перфорации относительно напряжений залегания на давление зарождения трещины и ее местоположение и ориентацию.

По работе есть следующие замечания:

1. При верификации результатов расчетов с аналитическим решением для круглой трещины (разделы 1.6 и далее) отсутствуют графики распределения самой относительной ошибки (для раскрытия, для коэффициентов интенсивности напряжений). В тексте указываются те или иные цифры ошибки, но при наличии графиков сделанные выводы были бы убедительнее.
2. В первой главе излагаются математические основы предложенных автором модификаций метода граничных элементов, которые используются затем в дальнейшей работе. Проделана огромная работа сравнения разных граничных элементов, специальных граничных элементов, разных аппроксимаций и т.д. и т.п. Было бы логичным подвести итоги проделанной работы и рекомендовать к использованию наиболее эффективные граничные элементы, наиболее эффективные аппроксимации и т.д. Четкого подведения итогов проделанной работы нет, что затрудняет понимание результатов двух последующих глав, поскольку в них есть просто ссылки на первую главу. На чем остановился автор в своих изысканиях оптимальных методов, не очень понятно.

Указанные замечания ни в коей мере не снижают высокий уровень проделанного исследования. Результаты, составляющие основное содержание диссертации, получены автором самостоятельно. Введенные критерии прочности при зарождении трещин, позволяющие учесть масштабный фактор являются новыми и достаточно убедительными (проведена валидация с результатами экспериментов).

Автореферат соответствует содержанию диссертации. Основные результаты опубликованы в 19 печатных работах (1 монография, 2 статьи в периодических изданиях, рекомендованных ВАК для представления основных научных результатов диссертаций на соискание ученой степени доктора или кандидата

наук, 5 статей в журналах, индексируемых в базах данных Scopus и Web of Science, 9 — в трудах международных и всероссийских конференций). Имеются 2 свидетельства о государственной регистрации программ для ЭВМ (Роспатент).

Работа представляет собой цельное научное исследование, результаты которого оформлены в виде комплекса программ. Результаты диссертационной работы используются в филиале «Технологической Компании Шлюмберже».

Таким образом, диссертация Куранакова Дмитрия Сергеевича является научно-квалификационной работой, в которой содержится решение задачи, имеющей значение для развития соответствующей отрасли знаний, а также изложены новые научно обоснованные технические, технологические решения и разработки, имеющие существенное значение для развития страны, что соответствует требованиям п. 9 «Положения о порядке присуждения ученых степеней», утвержденного постановлением Правительства Российской Федерации от 24.09.2013 г. № 842, предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени кандидата наук, а ее автор заслуживает присуждения искомой ученой степени.

Отзыв рассмотрен и утвержден на заседании кафедры газовой и волновой динамики механико-математического факультета МГУ имени М.В. Ломоносова протокол № 1 от « 17 » января 2022 г.

Отзыв составлен д.ф.-м.н., профессором кафедры газовой и волновой динамики механико-математического факультета Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Московского государственного университета имени М.В. Ломоносова» Звягиным Александром Васильевичем.

Д.ф.-м.н., профессор



Звягин А.В.

Зам. зав. кафедрой газовой и
волновой динамики, д.ф.-м.н., профессор



Смирнов Н.Н.

Зам. декана механико-математического
ф-та, д.ф.-м.н., профессор



Иванов О.А.