

**ОТЗЫВ официального оппонента
о диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук Удалова Артема Сергеевича
на тему: «Численные методы повышенного порядка точности в механике
трещин»
по специальности 1.1.8. – Механика деформируемого твердого тела**

Актуальным вопросом механики деформируемого твердого тела является задача о разрушении инженерных конструкций и пород вследствие наличия и развития в них системы трещин. Анализ прочности материалов без учета этих дефектов может приводить к завышению значений критических нагрузок и, как результат, к неверным прогнозам поведения тех или иных частей конструкций при нагружении.

Диссертационная работа Удалова А.С. посвящена моделированию напряжённо-деформированного состояния линейно-упругой теплопроводной среды, содержащей систему трещин, и подверженных механическому или тепловому воздействию. **Научная новизна** работы состоит в разработке новых методов решения задач линейной механики разрушения на основе улучшенного метода граничных элементов. По сравнению с существующими вариантами метода конечных элементов, сформулированные в диссертационной работе методы позволяют эффективно (с небольшим количеством элементов и вычислительных затрат) и с высокой точностью находить поля напряжений, перемещений, температур и тепловых потоков в любых точках среды, включая малую окрестность трещин. В том числе, это позволяет с высокой точностью вычислять все физические параметры, необходимые для анализа роста трещин, включая коэффициенты разложения М. Уильямса, а также коэффициенты интенсивности напряжений и тепловых потоков. Предложенные методы позволяют находить решение как в случае одиночной трещины, так и в случае сложных систем дефектов. Эффективное решение рассмотренных задач классическими методами представляется затруднительным, что определяет научную значимость предложенных численных методов.

Актуальность научного исследования обоснована применением полученных результатов для эффективного (точного и быстрого) решения широкого спектра практических задач, в том числе, в области технологий нефтесервиса и энергоперехода. Разработанный в диссертационной работе метод позволяет описать напряженное состояние пласта в окрестности разрывных структур (трещина гидроразрыва пласта (ГРП), сеть естественных трещин, тектонический разлом) в статических условиях. Это характерно для ряда технологических процессов, при которых изменение порового давления в окрестности нагнетательных или добывающих скважин приводит к изменению напряженного состояния пласта. Приведу ряд примеров:

1) циклическая закачка флюидов в пласт в рамках технологий увеличения нефтеотдачи, в процессе которой происходит закачка флюидов в пласт в скважине с созданной трещиной ГРП с последующим переводом скважины в режим добычи; требуется планирование режима закачки исходя из требований отсутствия существенных перемещений берегов трещины, что может привести к снижению площади трещины, заполненной проппантом и сопутствующему снижению добычи углеводородов;

2) эксплуатация нагнетательных скважин в рамках системы поддержания пластового давления для увеличения добычи соседних добывающих скважин в пластах с системой естественных трещин; изменение напряженного состояния при изменении порового давления может привести к активации (раскрытию) трещин, что вызовет риск прорыва нагнетаемого флюида в добывающие скважины и существенного снижения добычи углеводородов;

3) активация тектонических разломов в окрестности добывающих или нагнетательных скважин, что может вызвать риск землетрясений или прорыва нагнетаемого флюида в вышележащие слои (что недопустимо, например, при закачке углекислого газа в подземный пласт в рамках декарбонизации индустрии).

Диссертация состоит из введения, трёх глав, заключения и списка литературы.

Во введении описаны ключевые этапы развития механики разрушения. Приведены подробные обзоры исследований, посвященных различным подходам к решению задач механики трещин, описаны их преимущества и недостатки. Обосновывается актуальность и научная новизна работы, формулируются положения, выносимые на защиту. Формулируются основные методы исследования, дается обоснование достоверности результатов, приводится описание апробации и публикаций по теме диссертационной работы.

В первой главе диссертации формулируются задачи линейной теории упругости тел с трещинами. Описывается метод решения системы уравнений, сформулированной относительно напряжений с граничными условиями скачка перемещений на берегах трещин. Численный метод основывается на разложении искомого решения на отрезках разбиения трещины (граничных элементах, ГЭ) в конечный ряд по некоторым аналитическим решениям теории упругости. Для их поиска используется решение Колосова-Мусхелишвили, выраженное через функции комплексного переменного в форме интегралов типа Коши. Указанные интегралы содержат функцию, аппроксимирующую компоненты вектора перемещений берегов элемента трещины. Интегралы Коши имеют аналитическое решение для перемещений в виде многочленов относительно координаты вдоль элемента трещины: в классическом варианте метода ГЭ используются константы (нулевой порядок многочлена). В работе рассмотрены ГЭ первого (линейные функции) и второго (квадратичные многочлены) порядков.

Получено, что в задаче определения напряженного состояния в окрестности уединенной линейной трещины конечного размера даже при небольшом количестве ГЭ (20 элементов) метод второго порядка точности позволяет получить точное решение (относительная ошибка определения компонент напряжений в несколько раз ниже, чем в методе нулевого порядка). Метод первого порядка дает неприемлемую точность вычислений из-за нефизических осцилляций решения высокой амплитуды.

Разработаны два метода расчета коэффициентов интенсивности

напряжений. Первый использует определение искомым коэффициентов и позволяет вычислять их с высокой точностью на основе численных расчетов значений полей напряжений в точках вблизи вершины трещины. Вторым методом основывается на асимптотическом представлении М. Уильямса полей напряжений в окрестности вершины и может быть использован для поиска всех необходимых параметров на некотором расстоянии от вершины. Во всех случаях проведена верификация предложенных методов на основе сравнения с аналитическими решениями и продемонстрирована эффективность нового варианта метода ГЭ по сравнению с классическим, что обосновывает **достоверность** полученных результатов.

Вторая глава посвящена верификации разработанных численных методов решения для тел, ослабленных различными системами трещин. Сформулирована и подтверждена численно гипотеза о конечности области существенного влияния одной трещины как элемента бесконечной периодической системы параллельных трещин на итоговое распределение полей напряжений и перемещений. Для определенной конфигурации трещин установлена зависимость коэффициентов интенсивности напряжений от взаимного расположения групп трещин.

Рассмотрена линейно-упругая среда, ослабленная трещинами в виде ломаных линий. Наличие V-образного излома приводит к уменьшению коэффициентов интенсивности напряжений по сравнению со случаем одиночной прямолинейной трещины той же длины. Продемонстрирована возможность расчетов траектории роста трещин при помощи пошагового применения разработанного численного метода для анализа последовательности напряженно-деформированных состояний среды. Проведена валидация численного решения на экспериментальных данных в задаче об одиночной трещине, подверженной нагружению под углом к ней.

В третьей главе предложен метод граничных элементов второго порядка для численного решения определения квазистационарного распределения температуры в средах, ослабленных трещинами, и поиска сопутствующих

определяющих параметров (коэффициентов интенсивности теплового потока). Математически этот подход аналогичен сформулированным в первой главе методам решения задач линейной механики разрушения. Проведена верификация сформулированных методов и проверка гипотезы о возможности сведения решения задач с периодическими системами трещин к рассмотрению конечных систем. Построенный численный метод использован для решения новых задачи о влиянии большого числа ослаблений на распределение полей температуры и теплового потока в неподвижной сплошной среде.

В конце диссертации подведены итоги. Работа имеет законченную форму.

Апробация результатов исследования подтверждается докладами соискателя на научных конференциях, а также их публикациями в 5 печатных работах, 4 из которых в рецензируемых журналах, индексируемых в международных базах Scopus, Web of Science, RSCI. **Автореферат полностью соответствует содержанию диссертации.**

Тем не менее, к работе есть следующие замечания:

1. В обзоре на странице 12 упомянут энергетический критерий разрушения, основанный на рассмотрении J -интеграла. Известно, что теоретическая концепция J -интеграла была разработана в 1967 году Г.П. Черепановым и независимо в 1968 году Дж. Райсом. Однако автор ссылается только на работы Райса [11, 12] как автора этого критерия.

2. Недостаточно подробное описание постановок задач и полученных результатов в тексте диссертации, в том числе:

а) в последнем абзаце на стр. 37 описывается процедура численного поиска коэффициентов разложения М. Уильямса, что является важным результатом работы; следовало бы привести детальное описание численного алгоритма с формулировкой соответствующей системы линейных уравнений и поиска неизвестных коэффициентов;

б) в задаче о поиске напряженного состояния системы из двух трещин, сформулированной вначале раздела 2.1, отсутствует рисунок с

конфигурацией задачи, что сильно осложняет анализ результатов;

в) в тексте диссертации не приведены графики, подтверждающие результаты решений ряда задач (определение напряженного состояния материала в форме дуги на стр. 53, 54 и определение интенсивности теплового потока в задаче об одиночной трещине на стр. 71, 72);

3. В главе 3 рассмотрена плоская задача о стационарном распределении температуры в бесконечной теплопроводящей среде с N частично проницаемыми разрезами под действием теплового потока на бесконечности. Здесь возникает два вопроса:

а) трещины считаются частично теплопроницаемыми, на их берегах действует тепловой поток; при этом не поясняются физические причины частичной теплопроницаемости. Можно ожидать, что теплопроницаемость зависит от раскрытия трещин; если это так, то распределение тепла будет зависеть от термоупругих деформаций, влияющих на раскрытие трещин, и задачу следует формулировать в рамках связанной задачи теплопроводности;

б) решение уравнения теплопроводности с заданным тепловым потоком на бесконечности определяется с точностью до константы. Выбор значения этой константы не описан в тексте и необходим для построения распределения температуры, приведенного на Рис. 28.

Вместе с тем, указанные замечания не умаляют значимости диссертационного исследования. Диссертация отвечает требованиям, установленным Московским государственным университетом имени М.В. Ломоносова к работам подобного рода. Содержание диссертации соответствует специальности 1.1.8 - «механика деформируемого твердого тела» (по физико-математическим наукам), а также критериям, определенным пп. 2.1-2.5 Положения о присуждении ученых степеней в Московском государственном университете имени М.В. Ломоносова, а также оформлена согласно требованиям Положения о совете по защите диссертаций на

соискание ученой степени кандидата наук Московского государственного университета имени М.В. Ломоносова.

Считаю, что соискатель Удалов Артём Сергеевич заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.1.8 – «механика деформируемого твердого тела».

Официальный оппонент:

Боронин Сергей Андреевич

Кандидат физико-математических наук,

руководитель лаборатории цифрового моделирования многофазных систем в нефтегазовой индустрии, Автономная некоммерческая образовательная организация высшего образования «Сколковский институт науки и технологий»

Контактные данные:

тел.: 89104757816 e-mail s.boronin@skoltech.ru

Специальность, по которой официальным оппонентом защищена диссертация:
01.02.05 - «Механика жидкости, газа и плазмы»

Адрес места работы:

121205, г. Москва, Большой бу... тория Инновационного
Центра «Сколково», Скоп... ологий, лаборатория
цифрового моделире... зовой индустрии

Боронина С.А.