

## ОТЗЫВ

члена диссертационного совета на диссертацию Маркова Николая Сергеевича на тему: «Решение задач механики для слоистых структур с неоднородностями», представленную на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.02.04 – Механика деформируемого твердого тела

**Актуальность темы диссертации.** Исследование деформируемости, прочности, свойств слоистых материалов является одной из важнейших задач механики материалов. Особое значение учет слоистости имеет при решении задач горной механики. Постепенное истощение традиционных месторождений приводит к необходимости разработки технологических решений для разведки и разработки месторождений с трудноизвлекаемыми запасами, что накладывает дополнительные требования к точности геологических моделей. Это, в свою очередь, приводит к необходимости использования физико-механических, тектонофизических, геолого-геофизических свойств пород коллектора, соответствующих пластовым. В случае добычи полезных ископаемых учет слоистости горной породы позволяет увеличить количество извлекаемых запасов и уменьшить финансовые риски. Несмотря на это, на практике слоистость не всегда учитывается в полной мере. Так, например, при проведении численного моделирования роста трещин в слоистых породах упругие свойства слоев зачастую полагаются одинаковыми. В связи с этим, разработка подходов к учету слоистости при решении задач механики и исследование влияния слоистости на это решение, является актуальной задачей. Это подтверждается тем, что работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации в рамках соглашения о предоставлении субсидии № 075-15-2019-1406 от 19.06.2019 по теме: «Разработка прикладных программных средств для планирования и контроля операции гидравлического разрыва пласта с целью повышения эффективности нефтегазодобычи». Уникальный идентификатор соглашения: RFMEFI57517X0146.

**Новизна полученных результатов.** К наиболее значительным новым результатам диссертации можно отнести расширение возможностей модели слоистости, предложенной А.М. Линьковым, на случай гармонических задач и трёхмерных задач теории упругости. Для данной модели получены и представлены формулы для построения функции Грина для двумерного уравнения Лапласа и трехмерного уравнения Ламе. С помощью этих формул решен ряд практически важных задач (стр. 38-52, стр. 58-66) и показана степень влияния слоистости на результат (стр. 50-51, стр. 65-67). Во второй части (3. Модифицированная псевдотрёхмерная модель распространения плоской трещины в слоистой среде) работы представлена модифицированная модель трещины в слоистой горной породе, позволяющая рассчитывать геометрические характеристики трещины с точностью, близкой к точности планарной трёхмерной модели трещины [13]. Точность результатов определялась путем сравнения графиков.

**Достоверность** полученных результатов и выводов обусловлена использованием апробированных методик компьютерного моделирования, близостью к результатам, полученным численно и аналитически (А.Рейсе [73], С.Куо [48]), а также экспериментально (А.Рейсе [27]). В частности, показано (стр. 50, рис. 15), что решение задачи о круговой отверствии в полупространстве в частном случае отличается от

09/2-166 от 13.03.2020

аналитического решения, представленном в работе Н.Н. Лебедева [49], не более чем на 4%. Показано (стр. 61 рис19), что результаты решения задачи о радиальной трещине, находящейся под действием равномерного давления, полученные с применением альтернативных подходов А. Peirce [73], С. Куо [48] практически не отличаются от вычисленных при помощи разработанного подхода. Во второй части диссертации установлено, что результаты вычислений выполненных с использованием разработанной модифицированной модели, мало отличаются (рис. 15, стр. 61) от результатов, полученных с помощью более точной модели [13] и опубликованными в ряде научных статей (А. Peirce [27], Е. Starobinskii [86]).

**Практическая значимость.** Одной из важнейших прикладных задач является моделирование развития трещины в упругой слоистой среде при действии внутреннего давления. Практическая значимость проведенных исследований следует в частности из использования их результатов компанией «ПАО Газпром нефть». Это подтверждается наличием сертификата о регистрации программы: «Программа расчета скорости роста квазитрехмерной трещины ГРП в высоту в режиме доминирующей вязкости». Авторы: Марков Н.С., Линьков А.М. Правообладатель: ООО "Газпромнефть НТЦ". Свидетельство № 2019613238. Дата регистрации: 12.03.2019. Также, полученные результаты были использованы при выполнении работ с ООО «Газпромнефть НТЦ» по созданию симулятора «Кибер ГРП» для численного моделирования процессов, происходящих при добычи полезных ископаемых.

Работа объемом 197 страниц (из них русскоязычный вариант 100 страниц) состоит из введения, двух глав, заключения, списка литературы, 91 наименования и 27 рисунков.

**В первой главе** представлено расширение модели слоистости, предложенной А.М. Линьковым [53], на случай гармонических задач и трехмерных задач теории упругости. Рассмотрены особенности применения дискретного преобразования Фурье при численном построении функции Грина для слоистых структур. Исследован вопрос определения значений параметров преобразования Фурье, необходимых для построения функции Грина с заданной точностью. Представлены решения задач о круговой отверстии и радиальной трещине в слоистых средах, полученные методом граничных элементов, исследована степень влияния учета слоистости на решение.

**В второй главе** представлена модифицированная псевдотрехмерная модель распространения трещины гидроразрыва пласта в слоистой среде. Приводится описание подхода, позволяющего увеличить точность расчёта геометрических параметров трещины, изменяющихся с течением времени. Показано (стр. 85-86), что результаты, полученные с использованием модифицированной модели, с высокой точностью совпадают с результатами, полученными с использованием более точной модели.

#### **Замечания.**

1. В диссертации не отслеживается практическая сходимость результатов численных расчетов.
2. Не учитывается, что перед фронтом трещины возникает область упругопластического деформирования.

3. Из текста работы (часть 2) не ясно, является ли система дифференциальных уравнений жесткой. Не указано, какая численная схема применяется для решения полученной системы уравнений.
4. Из текста работы не ясно, какие параметры должны использоваться для успешного применения обратного преобразования Фурье.
5. Не понятно, всюду ли учитывается величина критического коэффициента интенсивности напряжений.
6. В части 2 работы не ясно, почему планарная трёхмерная модель трещины используется в качестве эталонного решения для расчета геометрических параметров трещины.
7. В работе имеются опечатки и стилистические неточности. Например, в формуле (62) используется обозначение  $\zeta$ , тогда как на рис. 11 применяется обозначение  $\zeta$ . При этом в части 2 буквой  $\zeta$  обозначается координата. Также на стр.62 вместо “трещина моделировалась” написано “трещина модулировалась”. Использование слов «Решение задач ...» в названии диссертации терминологически не является удачным.
8. Из текста работы не понятно, почему предлагаемый подход более эффективен, чем непосредственный расчет с использованием метода конечных элементов.

Указанные замечания не умаляют значимости полученных результатов и не снижают общего положительного впечатления от работы, проделанной соискателем.

Диссертация Маркова Николая Сергеевича на тему: «Решение задач механики для слоистых структур с неоднородностями» соответствует основным требованиям, установленным Приказом от 01.09.2016 № 6821/1 «О порядке присуждения ученых степеней в Санкт-Петербургском государственном университете», соискатель Марков Николай Сергеевич заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.02.04 – Механика деформируемого твердого тела. Пункт 11 указанного Порядка диссертантом не нарушен.

Член диссертационного совета

Доктор технических наук, профессор,

Профессор высшей школы механики

и процессов управления СПбПУ

подпись

Мельников Борис Евгеньевич

Дата

