

ОТЗЫВ

председателя 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. Многослойные структуры, содержащие различного рода неоднородности, имеют широкий спектр применения во многих отраслях техники, особенно в горнодобывающей и нефтегазовой промышленности. Исследование свойств и поведения таких структур при различных внешних воздействиях представляет чрезвычайно сложную проблему механики неоднородных сред, теоретическое решение которой, как правило, возможно только численными методами. Среди них наиболее эффективным методом решения соответствующих задач является метод граничных элементов, для применения которого необходимо знание функций Грина исследуемых структур. Поэтому тема диссертации, направленная на решение некоторых задач механики слоистых структур с неоднородностями путем обобщения метода нахождения функции Грина, основанного на применении преобразования Фурье, для оператора Лапласа и трехмерного оператора Ламе, несомненно является актуальной.

Новизна полученных результатов. Наиболее значительными новыми результатами диссертации являются:

Численный метод построения функций Грина для слоистых структур, основанный на применении преобразования Фурье, распространен на случай гармонических и трехмерных задач теории упругости с оценкой необходимой точности вычисления этих функций. Дано обобщение комплексного метода граничных элементов для уравнения Лапласа на задачи о слоистых структурах с неоднородностями, при помощи которого решена задача о действии потока на контуре кругового отверстия в слоистой структуре, состоящей из двух полуплоскостей, и проведен анализ этого решения в зависимости от значений относительной проводимости полуплоскостей и расстояния от центра отверстия до межфазной границы. Решена задача о раскрытии радиальной трещины, перпендикулярной границам слоев, под действием равномерного внутреннего давления в трехслойной упругой среде. Установлены границы влияния значений упругих модулей полупространств на раскрытие трещины, полностью находящейся в центральном слое. Разработан метод определения скорости роста псевдотрехмерной трещины гидроразрыва пласта в высоту в режиме доминирующей вязкости в слоистой среде путем сравнения с планарной моделью. Проведено сравнение результатов расчета геометрии трещины, полученных с использованием разработанного метода, с известными численными решениями. Показано, что разработанный метод позволяет увеличить точность расчета геометрических характеристик трещины в слоистой среде.

Достоверность полученных результатов и выводов обусловлена использованием апробированных методов построения функций Грина использующих преобразования Фурье, а также методов решения интегральных уравнений, сравнением с результатами, полученными аналитически для случаев, допускающих аналитическое исследование, качественным и количественным совпадением с результатами теоретических исследований других авторов. В частности, решение для кругового отверстия в случае полупространства с сильно проводящей границей с высокой степенью точности совпадает с известным аналитическим решением. Также, результаты решения задачи методом граничных элементов о радиальной трещине, находящейся под постоянным давлением в трехмерной слоистой среде, практически совпадают в предельном случае с результатами, полученными другими авторами с использованием альтернативных подходов.

Ценность для науки и практики. Результаты, полученные в данной работе, показали эффективность численной реализации метода нахождения функции Грина для слоистых структур, основанного на применении прямого и обратного преобразования

Фурье. Умение получать функции Грина для слоистой среды, хотя и численно, но с необходимой точностью и с наименьшими затратами компьютерного времени, трудно переоценить, поскольку в сочетании с методом граничных элементов позволяет решать различные задачи, связанные с исследованием процессов, протекающих в подобных средах. Результаты работы имеют большое практическое значение, например, для моделирования и исследования трещины гидроразрыва пласта в слоистой породе – одной из важнейших прикладных задач, возникающих при изучении слоистых структур. Представляет также интерес возможность применения представленного в работе способа расчета функции Грина при моделировании процессов в слоистой среде с естественной трещиноватостью.

Работа объемом 100 страниц состоит из введения, трех глав, заключения, списка литературы из 91 наименований и 27 рисунков и 4 таблиц.

В первой главе представлен аналитический обзор методов исследования решения задач механики для слоистых структур. Излагается подробная история развития методов решения задач для слоистых структур. Описываются этапы совершенствования численного построения функций Грина для слоистых структур, основанного на применении прямого и обратного преобразования Фурье. Указывается на приближенный характер существующих моделей трещины гидроразрыва, ограниченных, в основном, рассмотрением плоских трещин. Приводится исторический путь развития подходов к решению прикладных задач механики слоистых структур с упором на проблемы, связанные с гидроразрывом пласта.

Во второй главе приведен метод построения функции Грина слоистой среды для двумерного уравнения Лапласа и найден способ оценки и увеличения его точности. Дается обобщение метода комплексных граничных интегральных уравнений на задачи для слоистых структур с неоднородностями, с помощью которого решена задача о круговом отверстии в слоистой среде с заданным на контуре потоком. Для кругового отверстия в полуплоскости исследовано влияние проводимости границы полуплоскости и расстояния от центра отверстия до границы на отношение максимального и минимального значений потенциала на контуре отверстия. Показано, что сильно проводящая граница оказывает большее влияние на потенциал отверстия, чем непроницаемая граница. Приведен метод построения функции Грина слоистой среды для трехмерного уравнения Ламе, позволяющий рассчитать все ядра граничных интегральных уравнений. Решена задача о радиальной трещине, перпендикулярной границам слоев, под действием постоянного давления. Исследовано влияние упругих свойств слоев на раскрытие трещины и коэффициенты интенсивности напряжений.

В третьей главе проведено исследование роста трещины в модифицированной псевдотрехмерной (P3D) модели под действием давления жидкости в режиме доминирующей вязкости. Трещина распространяется перпендикулярно и параллельно поверхностям слоев. Предложен принцип соответствия, который устанавливает соответствие между псевдотрехмерной моделью и соответствующей KGD моделью, в которой определяется скорость роста трещины, в терминах физических величин, присутствующих в обеих моделях. Согласно этому принципу, скорость роста трещины перпендикулярно поверхностям слоев определяется путем сравнения высоты и среднего раскрытия в P3D и KGD моделях. Приводится сравнительный анализ численных результатов профиля трещины с соответствующими результатами, полученными в рамках других приближенных моделей.

Замечания по работе.

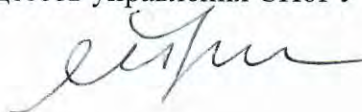
1. В ряде мест отсутствуют необходимые ссылки на источники приводимых соотношений или высказываний, в частности, нет ссылок на уравнения (9)-(12), формулы (72), (74), фундаментальное решение Ламе (101) и усилия (102)-(104), формулы для КИН (119), уравнения типа Пуазейля (122).

2. В то же время приводится формула (110) для раскрытия трещины со ссылкой на книгу Н.И.Мусхелишвили ([69] в списке литературы), в которой эта формула отсутствует.
3. Фундаментальное решение для периодической однородной изотропной среды представлено в диссертации в виде комплексной многозначной функции (58), каждая ветвь которой является периодической в любом направлении. Такую функцию трудно назвать фундаментальным периодическим решением уравнения Лапласа для структуры, периодической только вдоль направления x_2 , (т. е. y в формуле (58)).
4. Утверждение на стр. 41, «что если $C(x_1, x_2) = const$, то $\hat{\zeta} \rightarrow 0$ » выглядит странным, так как из равенства (62) следует, что если $C(x_1, x_2) = const$ то выполняется точное равенство $\hat{\zeta} = 0$.
5. Из рис. 24 (стр. 66) видно, что график раскрытия радиальной трещины при приближении к краю трещины в точках касания трещины и границы слоя, стремится к ненулевому значению (красные крестики), хотя раскрытие трещины вдоль контура трещины предполагается равным нулю.
6. Утверждение на стр. 82, что «Разумно принять во внимание, что до тех пор, пока трещина не достигла границ продуктивного слоя, она распространяется как радиальная трещина под действием равномерного давления» (стр. 82) нуждается в пояснении. Дело в том, что в РЗД модели высота трещины намного меньше ее длины. Распространение такой трещины вряд ли можно будет такое же, как и распространение радиальной.
7. Во второй главе диссертации излагается метод нахождения скорости роста трещины перпендикулярно слоям в модифицированной псевдотрехмерной модели. Приводится сопоставление профилей трещины, рассчитанные по этой модели путем использования принципа соответствия, с соответствующими другими решениями. Вместе с тем естественным итогом указанного метода могли бы стать результаты вычислений скорости роста трещины и зависимости среднего раскрытия и высоты трещины от времени, которые, к сожалению, в работе отсутствуют.
8. Хотя работа написана достаточно ясным и хорошим литературным языком, в тексте содержится довольно много опечаток.

Указанные замечания не умаляют значимости полученных результатов и не снижают общей положительной оценки работы.

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.

Председатель диссертационного совета
Доктор физико-математических наук, профессор,
профессор кафедры вычислительных методов
механики деформируемого тела факультета
прикладной математики – процессов управления СПбГУ



Греков Михаил Александрович

10.03.2020