

Отзыв
официального оппонента о диссертационной работе
Сыромятникова Павла Викторовича
«Динамика сложных многослойных гетерогенных сред»,
представленной на соискание ученой степени доктора физико-
математических наук по специальности 01.02.04 –Механика
деформируемого твердого тела

Актуальность и цель исследований.

Исследование распространения волн в слоистых структурах различной природы при наличии разных типов дефектов является одной из важнейших задач механики деформируемого твердого тела. Целью диссертационной работы П.В. Сыромятникова является исследование динамических процессов в многослойных полуограниченных упругих и термоэластопластических средах с внутренними неоднородностями различной физической природы, представляющих собой трещины, жесткие включения, электроды и другие неоднородности. Рассматриваемые в диссертации краевые задачи для слоистых упругих и термоэластопластических сред весьма актуальны, поскольку функционирование большого числа технических устройств, например, линий задержки, пьезоэлектрических и пироэлектрических преобразователей, основано на эффектах связанности полей. Отметим, что к числу таких задач относится фундаментальная проблема оценки сейсмичности и прогноза землетрясений на основе измерения различных физических полей, в которой анализ напряженно-деформированного состояния литосферных плит требует учета помимо упругой анизотропии, связанности физически различных полей (механических, электромагнитных и тепловых), а также учета влияния внутренних неоднородностей. Задачи такого типа достаточно давно в Кубанском государственном университете.

В диссертационной работе исследование динамики различных сред основано на анализе однородных и смешанных краевых задач, основным аппаратом исследования которых является одномерное и двумерное преобразование Фурье, численный расчет полей на основе интегральных представлений решений краевых задач в виде одно- и двукратных интегралов Фурье. Аналогичные интегральные представления встречаются достаточно часто в различных областях математической физики, поэтому методы расчета подобных интегралов представляют значительный интерес. В первую очередь разрабатываемые методы расчета интегралов Фурье направлены на описание и анализ распространения упругих волн в многослойных анизотропных средах, что актуально для разработки диагностики новых композиционных материалов, деталей и конструкций из композитов, в области неразрушающего контроля, сейсморазведки и геофизики. Решение задач, связанных с возбуждением поверхностными и внутренними источниками волновых полей в упругой анизотропной среде, является ключевым этапом решения обратных задач

определения параметров скрытых неоднородностей типа трещин.

На сегодняшний день задача расчета двукратных интегралов Фурье, представляющих решения краевых задач термоэластостатики, еще далека от исчерпывающего решения. Разработка различных численных и численно-аналитических методов расчета двумерных интегралов Фурье составляет основное содержание диссертационной работы.

Последняя глава диссертации посвящена анализу возмущений поверхности упругого слоя, вызываемых подвижным осциллирующим источником поверхностных напряжений. Краевые задачи с подвижным источником весьма сложны для анализа и представляют большой интерес в первую очередь в области моделирования движения высокоскоростного транспорта. Используемый в диссертационной работе подход к решению задачи с подвижным источником основан на методе, разработанном ранее в ряде работ.

Изложенные выше соображения свидетельствуют об актуальности темы диссертации и решаемых в диссертационной работе задач.

Достоверность и обоснованность результатов обеспечивается строгостью постановок и математических методов решения рассматриваемых задач, сопоставлением результатов с результатами других авторов, с имеющимися экспериментальными данными.

Диссертация П. В. Сыромятникова состоит из двух томов. Первый том имеет объем 292 с. и включает в себя введение, шесть глав, заключение, список литературы из 350 ссылок, список иллюстративного материала. Во второй том, имеющий объем 135 с., входят приложения, содержащие иллюстрации к пятой и шестой главам, список свидетельств об официальной регистрации программ, использованных для расчетов полей, и одного патента.

Во **введении** приводится обзор литературных источников по теме диссертации, обосновывается актуальность темы диссертационного исследования, формулируется цель и основные задачи исследования, определяются научная новизна и практическая значимость результатов.

В первой главе, имеющей вводный характер, излагаются основные сведения о применении факторизационных методов к решению различных краевых задач.

Во второй главе приведено описание основных соотношений динамики термоэластостатического тела, в рамках линейной теории дается постановка смешанных динамических задач о взаимодействии жестких штампов и/или электродов с многослойной полугораниченной термоэластостатической средой, содержащей включения и трещины. Для моделирования динамики многослойных сред с неоднородностями формулируется система дифференциальных уравнений второго порядка в частных производных с начальными и краевыми условиями. Описывается общая схема решения, вспомогательные задачи, вывод в образах Фурье и Лапласа функционально-матричных соотношений, сведение на основе предварительных построений смешанной начально-краевой задачи к системе матричных интегральных уравнений I рода.

В третьей главе описываются методы построения символов блочных

матриц Грина для многослойных термоэлектроупругих сред без внутренних неоднородностей и при наличии внутренних неоднородностей различной физической природы. Приводится описание алгоритма расширения диапазона вычислимости символа матрицы Грина. В конце главы приведены основные асимптотические свойства символов блочных матриц Грина для рассматриваемых краевых задач.

В четвертой главе представлены основные теоретические результаты диссертационной работы, в ней описаны численно-аналитические методы расчета двукратных интегралов Фурье, в виде которых может быть представлено решение рассматриваемых в диссертационной работе краевых задач термоэлектроупругости. Для ближней зоны предложены несколько методов расчета двукратного интеграла Фурье: метод прямого контурного интегрирования, методы, основанные на теории вычетов для осесимметричной и для неосесимметричной нагрузки. Для дальней зоны предложены способы вычисления интегралов Фурье на основе теории вычетов и асимптотический анализ на основе метода стационарной фазы.

В пятой главе описаны основные численные результаты, полученные с помощью разработанных в диссертации методов, некоторые теоретические результаты, касающиеся принципов отбора единственного решения в слоистых структурах.

Рассмотрены примеры различий в применении трех принципов отбора решения, часто используемых при корректном построении ядер интегральных уравнений для однородного или многослойного термоэлектроупругого полупространства: принципа Зоммерфельда, принципа излучения энергии и принцип предельного поглощения, представлены численные и аналитические обоснования различий в применении указанных принципов.

Приведены примеры расчета модельных гармонических и нестационарных краевых задач для многослойных анизотропных, электроупругих и термоэлектроупругих сред: механических смещений, электрического потенциала и температуры многослойного термоэлектроупругого пакета, возбуждаемых поверхностными и внутренними механическими, электрическими или тепловыми нагрузками.

Приведено описание метода и результаты расчета пространственных зон дилатансии (разуплотнения) в упругом слое, вызываемых различными внутренними механическими нагрузками.

Представлены примеры решения интегральных уравнений, возникающих в задачах идентификации параметров интерфейсной трещины в упругой полосе и примеры результатов идентификации, приведены некоторые практические выводы и рекомендации по решению задач идентификации трещин, расположенных в плоскости, параллельной граничным плоскостям упругой полосы.

В шестой главе численно моделируется возмущения поверхности упругого слоя, вызываемые подвижным осциллирующим источником поверхностных напряжений. Возмущения поверхности получены в виде интегралов Фурье, рассчитываются с помощью метода прямого контурного интегрирования.

Подробно исследован режим движения без осцилляций, режим движения с осцилляциями, исследованы приближенные амплитудно-скоростные и амплитудно-частотные характеристики механической системы «подвижный источник - упругое основание».

В заключении сформулированы основные результаты диссертационной работы.

Научную новизну составляют следующие результаты:

- 1) разработан новый устойчивый численно-аналитический метод построения символа Фурье блочной матрицы Грина многослойной полуограниченной термоэластопругой среды с произвольной термоэластопругой анизотропией каждого слоя, содержащей внешние и внутренние механические, тепловые и электрические неоднородности;
- 2) разработаны новые численно-аналитические методы и алгоритмы расчета интегральных представлений механических, электрических и тепловых характеристик в виде двукратных интегралов Фурье, полученных при решении краевых задач термоэластопругости для многослойных сред для ближней и дальней зоны при возбуждении колебаний поверхностными и/или внутренними гармоническими источниками в виде трещин или включений: метод прямого контурного интегрирования, методы, использующие теорию вычетов для осесимметричной и для неосесимметричной нагрузки, асимптотический анализ полей в дальней зоне;
- 3) получены аналитические и численно-аналитические оценки различных параметров метода прямого контурного интегрирования и метода вычетов, позволяющие оптимизировать процессы вычислений;
- 4) на основе метода прямого контурного интегрирования разработан новый эффективный подход для расчета возмущений на поверхности изотропного упругого слоя, вызываемых осциллирующим и движущимся с постоянной скоростью поверхностным механическим источником, в широком диапазоне скоростей и частот, как для плоской, так и для пространственной задачи;
- 5) получены новые численные результаты решения ряда модельных динамических краевых задач теории упругости, электроупругости, термоэластопругости для многослойных сред, возбуждаемых поверхностными или внутренними физически разнородными источниками колебаний; решения задач идентификации параметров трещины в упругом слое; решения краевых задач для осциллирующего источника, движущегося по поверхности упругого изотропного слоя; алгоритм и результаты расчета пространственных зон дилатансии в упругом слое.

Научное и практическое значение результатов диссертации заключается в возможности качественного и количественного исследования с помощью разработанных методов динамических процессов в многослойных упругих и термоэластопругих средах при наличии неоднородностей различной физической природы.

Методы построения символов блочных матриц Грина использованы как при реализации механической концепции прогноза сейсмичности, так и при

выполнении ряда научных проектов ЮНЦ РАН и Кубанского госуниверситета при решении краевых задач теории упругости, электроупругости, термоэлектроупругости, для построения ядер систем интегральных уравнений термоэлектроупругости.

Методы расчета двукратных интегралов Фурье, полученных для решений краевых задач термоэлектроупругости, могут применяться при проектировании различных электромеханических и термоэлектрических преобразователей, при создании гибридных композиционных материалов и конструкций из них.

Методы расчета возмущений, вызываемых движущимся источником, имеют теоретическое и прикладное значение для разработки и проектирования высокоскоростных транспортных средств и соответствующей инженерной инфраструктуры, для анализа волновых полей и минимизации вибрационного воздействия на близлежащие наземные и подземные сооружения, окружающую среду.

Алгоритмы решения задачи идентификации параметров интерфейсной трещины в упругом слое могут быть использованы в задачах неразрушающего контроля.

Метод расчета пространственных зон дилатансии может найти применение в области геофизики и сейсмологии.

Основные положения диссертационной работы достаточно полно опубликованы в открытой печати и апробированы на международных и всероссийских конференциях. Основные результаты исследований диссертации опубликованы в 19 работах в научных изданиях, входящих в базы данных Scopus, Web of Science и рекомендованных ВАК РФ. Также имеется 24 свидетельства о государственной регистрации программ для ЭВМ и один патент.

По диссертационной работе имеется ряд замечаний:

1. При анализе матриц-функций Грина в диссертации весьма важное значение играет структура дисперсионных соотношений для рассматриваемых задач, особенно для анизотропных структур, для которых эти множества не являются осесимметричными. К сожалению, в диссертации детальному анализу этих множеств, различным ситуациям, связанных с пересечением их компонент, уделено мало внимания. Такие ситуации могут в значительной степени изменить структуру волновых полей в ближней и дальней зоне, асимптотические представления.

2. В главе 5 автором рассматриваются задачи расчета полей в слоистой среде с трещиной и вопросы идентификации параметров, ее характеризующих. К сожалению, автор диссертационной работы не знаком с целым рядом работ, выполненных оппонентом и его учениками как в области колебаний слоистых структур с трещинами, так и в задачах их идентификации (Ватульян А.О., Явруян О. В. ПММ, 2006, Ватульян А.О., Азарова П. А., Явруян О. В. Механика композиционных материалов и конструкций, 2008), где на основе асимптотического анализа предложены экономичные способы идентификации параметров наклонных трещин в слое, не использующие минимизацию

функционала невязки.

3. Во всех расчетах в первом и втором томах в диссертации автор оперирует с безразмерными величинами частоты, модулей упругости (например, на с.127 при описании графиков $\omega = 0.52$). К каким величинам они отнесены, понять из предыдущего текста нельзя, что затрудняет оценку результатов диссертации. Безразмерная частота появляется лишь на с.189, и обозначена как $\bar{\omega}$. Кстати, далее на с.219 и в приложениях надчеркивание пропадает. То же замечание относится к автореферату, где при описании расчетов присутствуют как размерные, так и безразмерные частоты и линейные размеры.

Кроме того, процедура обезразмеривания является важным этапом при исследовании задач для связанных полей, особенно для задач термоэластостатики. Каким образом это осуществил автор - неясно.

3. Имеется ряд замечаний редакционного характера

1. на с. 42 при формулировке граничных условий для пластин в формулах (1.5.3) и (1.5.4) должно быть по два граничных условия;

2. на с. 52 после формул (2.1.1) в выражении для относительной температуры θ потеряна величина T_0 в знаменателе;

3. на с.71 автор пишет о неоднозначности решений в термоэластостатики для слоистых структур, видимо, имея ввиду соответствующий факт в теории упругости. На самом деле, в силу отсутствия в этом случае вещественных компонент у дисперсионного множества, имеется затухание при удалении от источника и решение, удовлетворяющее условию ограниченности, единственно;

4. неаккуратной выглядит оценка в неравенстве (4.7), в которое входит контур и числовая величина R ;

5. неверно записано равенство (4.1.7), в котором слева величина, зависящая от времени, а справа зависимости от времени нет, очевидно утрачен экспоненциальный множитель;

6. неясно, что понимает автор под названием «метод интегрирования вычетов в дальней зоне». Вычеты - это некоторые числовые характеристики мероморфных функций в окрестности полюсов, что же здесь интегрируется?

7. непонятно, что же будет с оценкой (4.1.19) в случае, когда $u(r) = 0$ (такие ситуации возникают довольно часто).

8. при описании параметров на с.181 для плотности окиси цинка автор упустил множитель 10^3 ;

9. при анализе задач в шестой главе представлены результаты расчетов волновых полей (и в автореферате на с.32), которые непонятно для каких скоростей движения осуществлялись; с одной стороны - представлены безразмерные значения, с другой указано, что это скорости. Видимо, автор анализирует сверхзвуковой случай, однако для практических приложений гораздо более важным является этот анализ в дозвуковом случае.

Указанные замечания не затрагивают основных результатов и не снижают научной и практической значимости диссертационной работы.

Диссертация Сыромятникова П.В. является законченным научно-исследовательским трудом, выполненным автором самостоятельно на достаточно высоком научном уровне.

Автореферат правильно и полно отражает содержание диссертации. Основные результаты диссертации полно и подробно представлены в центральной печати. Диссертация выполнена в рамках паспорта специальности ВАК 01.02.04 — механика деформируемого твердого тела (пп. 5,6,7,8).

Считаю, что диссертационная работа П.В. Сыромятникова «Динамика сложных многослойных гетерогенных сред» соответствует п.п. 9, 10 «Положения о присуждении ученых степеней», утвержденного постановлением Правительства Российской Федерации от 24 сентября 2013 г. №842 (в ред. постановления Правительства РФ от 21.04.2016 г. №335), а ее автор Сыромятников Павел Викторович заслуживает присуждения ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 01.02.04 — механика деформируемого твердого тела.

Официальный оппонент,
заведующий кафедрой теории упругости
федерального государственного
автономного образовательного учреждения
высшего образования
«Южный федеральный университет»,
доктор физ.-мат. наук (специальность 01.02.04-механика деформируемого
твердого тела), профессор
e-mail: vatulyan@math.rsu.ru
тел. 8-918-58-96-075

« 24» мая _ 2017 г.

Ватulyян Александр Ованесович

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Южный федеральный университет», 344006 г. Ростов-на-Дону, ул. Б. Садовая, 105/42

e-mail: info@sfedu.ru

+7-863-305-19-90,
факс: +7-863-263-87-23

