

Отзыв

официального оппонента на диссертацию Галыбина Александра Николаевича «Некорректные задачи теории упругости для реконструкции полей напряжений в земной коре» по специальности 25.00.10 – Геофизика, геофизические методы поисков полезных ископаемых, представленную на соискание ученой степени доктора физико-математических наук

Представленная работа посвящена развитию математического аппарата линейной теории упругости применительно к задачам определения полей современных напряжений в массиве горных пород и реконструкции палеонапряжений

Актуальность задачи связана с тем, что все горные работы проходят в верхнем слое земной коры, это требует знания напряженного состояния еще на стадии проектирования для обеспечения безопасности подземных и открытых работ, а также управления горным давлением. С другой стороны катастрофические явления, связанные с землетрясениями, в том числе с образованием цунами, также определяются напряженным состоянием, что требует разработки соответствующих математических методов для анализа полей напряжений, характерных для масштаба тектонических плит.

Работы по изучению напряженного состояния соответствуют приоритетным направлениям развития науки в областях «Технологии поиска, разведки, разработки месторождений полезных ископаемых и их добычи» и «Рациональное природопользование».

Имеет значение также и тот факт, что исследование плоской задачи теории упругости – это классический раздел механики, в котором получен целый ряд фундаментальных результатов. Поэтому постановки и решения новых задач в этой области представляют и большой теоретический интерес.

Цель, новизна и задачи исследований состоят в построении математических моделей для расчета полей упругих напряжений по данным об индикаторах напряжений, в частности по ориентациям осей главных напряжений. Автор ставит целью разработку нового подхода, который свободен от недостатков часто используемого метода, основанного на решении обратных задач теории упругости. В качестве такого подхода предложено использовать экспериментальную информацию непосредственно в граничных условиях, что приводит к новым формулировкам краевых задач теории упругости. Такой подход существенно отличается от используемых ранее, принятых в работах зарубежных ученых Хансена и Маунта (Hansen, Mount), Ли и Анжелье (Lee, Angelier); Хайдбаха (Heidbach) Хилиса и Рейнольдса (Hillis, Reynolds), которые используют чисто

интерполяционные подходы, и Клотинга и Вортеля (Cloetingh, Wortel), Кобленца (Coblentz) и Мюллера (Müller) с соавторами, которые используют гипотетические граничные условия в напряжениях с целью подобрать их таким образом, чтобы удовлетворить наблюдаемым ориентациям главных напряжений (обратные задачи). С другой стороны, предлагаемый подход также отличается от подхода ряда авторов, в которых в качестве нагрузок учитываются только гравитационные, как, например, в работах Фу и Хуанга (Fu, Huang), Коптева и Ершова.

Цели и задачи данного исследования соответствуют существующим тенденциям в геомеханике. Следует отметить, что использование упругой реологии земной коры может являться ограничением на применение полученных результатов к некоторым практическим ситуациям, где требуется учет неупругого деформирования среды, в частности развитие пластических деформаций, анализу которых посвящен ряд работ оппонента (см ссылки в разделе «Замечания»). Тем не менее круг задач, в рамках которого остается верным упругий подход, весьма значителен, что открывает возможности применения полученных автором результатов как для практических задач, так и для теоретических исследований в области, изучающей геодинамику земной коры.

Анализ работы

Диссертация состоит из введения, 8 глав, заключения, списка литературы и приложения.

Во введении обсуждается актуальность темы диссертации, научная новизна и практическая значимость, сформулированы цели и задачи исследования а также положения, выносимые на защиту.

В первой главе приведен обстоятельный анализ проблемы изучения напряжений в земной коре с упором на широко используемые методики моделирования напряженного состояния на основе решения обратных задач механики деформируемого твердого тела. Обсуждаются недостатки такого подхода и определяются основные цели работы и направления исследований.

Вторая глава представляет основную технику исследований, а именно метод комплексных переменных применительно к теории плоской упругости. Приведены основные уравнения теории упругости в комплексных координатах для изотропных и ортотропных сред. В конце главы показано, что поля траекторий главных напряжений должны удовлетворять специальным условиям, для того чтобы не противоречить всем соотношениям теории упругости.

Основная методика исследований приведена в главе 3 и развита в главах 4 и 5. Методика основана на сведении краевых задач теории упругости к сингулярным интегральным уравнениям общего вида, но с однородной правой частью. Уравнения такого типа не позволяют использовать стандартные численные методы, поскольку они непосредственно приводят к тривиальному решению. Автор предложил использовать полуаналитический метод регуляризации, путем решения характеристического уравнения, дополненный численным решением уже неоднородного уравнения, которое получается после регуляризации. Такой подход использован в главе 4 для анализа разрешимости ряда неклассических задач теории упругости, в которых граничные условия сформулированы в виде ориентаций напряжений, смещений или усилий. При этом величины их остаются неизвестными. В результате установлено, что упругие задачи такого типа могут быть разрешимы. Приведены условия их разрешимости и определено количество допустимых независимых решений (исходя из анализа граничных условий). В главе 5 приведены аналитические решения задач главы 4 для случая простейших контуров в виде круга и полуплоскости, которые убедительно демонстрируют достоверность результатов, получаемых с помощью предложенной автором методики исследования на основе решения интегральных уравнений. Результаты глав 3 – 5 составляют существо первых трех защищаемых положений. Следует отметить значимость полученных новых результатов, которые существенно дополняют математическую теорию упругости в плоской постановке.

В главе 6 автор разработал численные методы реконструкции напряжений в случае, когда исходные данные заданы в виде ориентаций осей главных напряжений в некоторых точках внутри области (включая границу). Данная задача сведена к задаче оптимизации, в которой минимизируется норма отклонения расчетных данных от исходных. Поскольку величины напряжений неизвестны, то задача не имеет единственного решения, однако траектории главных напряжений определяются однозначно. При этом максимальные касательные напряжения могут быть определены с точностью до мультипликативной постоянной, а компоненты напряжений зависят от двух произвольных постоянных. Предложено два подхода. Первый использует аппроксимацию комплексных потенциалов Колосова-Мусхелишвили многочленами, второй — предполагает разбиение на конечные элементы, в которых потенциалы аппроксимируются многочленами невысоких степеней и вводятся условия непрерывности на границах между элементами. В любом случае задача сводится к переопределенной системе линейных алгебраических уравнений, приближенное решение которой находится методом наименьших квадратов. Оба подхода были оттестированы на синтети-

ческих данных и применены далее для расчета полей напряжений в экспериментах на фотоупругих материалах. Для фотоупругости были реконструированы не только поля траекторий, но и изолинии максимальных касательных напряжений, т.е. фактически поле изохром, которое наблюдается непосредственно в эксперименте. Показано, что результаты реконструкций вполне удовлетворительно описывают эксперименты. Этот факт указывает достоверность предложенной численной методики.

В главах 7 и 8 метод, предложенный в главе 6, применен для анализа полей современных напряжений в земной коре по данным об ориентациях главных осей напряжений, включенных в мировую базу данных по напряжениям — WSM, где хранится более 20 тыс. данных. В главе 7 автор также проанализировал эволюцию полей палеонапряжений, которые были характерны для четырех исследованных районах Земли в разные геологические эпохи. Также в главе 7 решения, построенные для Европы, показывают удовлетворительное совпадения с результатами, полученными другими авторами и другим методом. Проанализировано поле напряжений австралийского континента, где на основе численного решения и аналитических решений из главы 5 дано объяснение резкому развороту направлений главных напряжений при обходе контура Австралии, которое заключается в наличие особой точки, в которой напряженное состояние является гидростатическим. В главе 8 метод главы 6 развит на случай области, состоящей из нескольких подобластей. Проведен анализ полей напряжений на границе между Индо-Австралийской и Евро-Азиатской плитами. Расчеты показали, что эпицентры цунамигенных землетрясений 2004 и 2005 гг. попадают в зону пониженного максимального касательного напряжения. Это обстоятельство позволило автору выдвинуть предположение по районированию цунамигенных зон. Автор провел исследования изменения напряженного состояния после разрушительно землетрясения 2004 г. в трех районах земной коры. Было показано, что изменения значительны в регионе острова Суматры, где это землетрясение и произошло, и менее заметны на удалении от эпицентра. Результаты глав 6 – 8 обосновывают защищаемые положения 4 – 7 и представляют значительный интерес для исследователей, работающих в области геодинамики, поскольку способствуют более глубокому пониманию физических процессов, определяющих напряженное состояние земной коры.

Значимость полученных результатов для науки состоит в

- существенном расширении применимости методов математической теории упругости для анализа полей напряжений;

- разработке новых численных подходов к задаче реконструкции напряжений на основе метода Трефтца для комплексных потенциалов, которые позволяют усовершенствовать существующие методы расчета полей напряжений;
- создании теоретических предпосылок для возможности исследования полей современных напряжений и палеонапряжений в земной коре и прогноза цунамигенных областей.

Замечания

1. На стр. 74 диссертации вводится криволинейная ортогональная система координат, причем предполагается, что криволинейные координаты имеют смысл длин дуг вдоль соответствующих линий.

Натуральная параметризация возможна только для одной линии. Для сетки линий такая параметризация невозможна, исключая тривиальный случай прямолинейных линий.

Поэтому формулы (2.72) и соответствующие формулы ниже, включая формулы (2.90) для вторых производных, необходимо подправить.

2. На 78, 79 указывается, что в случае пластического поведения среды по критерию Треска ($\tau_{\max} = const$) выполняется уравнение (2.22), в котором вместо D следует использовать $\tau_{\max} \exp(-2i\vartheta)$. Последнее — бесспорно, а с первой частью утверждения (выполнением уравнения (2.22)) — согласиться нельзя.

Оппонент в свое время получил уравнение, описывающее геометрию сетки линий скольжения идеально пластического тела. Это уравнение значительно отличается от уравнения (2.22) диссертации и содержит вторую производную от логарифма тангенса неизвестной функции. (А.Ф. Ревуженко. Один класс точных решений уравнений идеальной пластичности, Журнал прикладной механики и технической физики, 1975, № 2, с. 102 – 107).

3. На стр. 82 указывается: «Следует подчеркнуть, что условие того, что средние напряжения представляются гармонической функцией, допускается на случай, когда реология среды не является упругой. При выполнении этого условия все постановки краевых задач, в которых не используется закон Гука, эквивалентны упругим постановкам...».

Данное утверждение является, по-видимому, ошибочным. Условие гармоничности среднего напряжения фактически эквивалентно условию совместности деформаций, именно упругого тела. Представляется, что построить для таких условий конкретный пример неупругой реологии — невозможно.

4. На стр. 190 указывается: «Очевидно, что никакие определяющие для решения системы (6.1) не требуются. Таким образом, решения, найденные из этой системы можно отнести к любому материалу, независимо от его механического поведения».

С этим утверждением согласиться нельзя. Выше на стр. 189 автор пишет: «Система (6.1) представляет собой полную систему... при условии, что траектории напряжений известны». В геометрии данных траекторий как раз и содержится информация об определяющих уравнениях среды. Поэтому вывод автора «о независимости от механического поведения» точнее было бы исключить из текста. Тем более автор и сам пишет на стр. 191 «известное поле траекторий главных напряжений служит, в некотором смысле, для замещения реологических уравнений».

5. Неясна мотивация исследования задач в случае соосности векторов смещений и усилий — стр. 152.

6. В работе встречаются опечатки. Например, в номерах формул на стр. 181. Неточные выражения (стр. 209: в изотропных точках главных направлений не существует. Точнее было бы сказать, что их существует бесконечно много. «Тождества могут играть роль граничных условий...» — стр. 115. В формулах (2.104), стр. 81, логарифм можно было бы опустить, и некоторые другие.

7. Представляется, что и в названии диссертации слово «некорректные» было бы лучше заменить на слово «неклассические».

Сделанные замечания не затрагивают главное существо работы, которая выполнена на высоком научном уровне, а полученные в ней результаты представляют существенное значение для геомеханики.

Достоверность полученных результатов видится в их внутренней непротиворечивости, физической обоснованности предлагаемых постановок задач, использовании строгих методов исследования, сопоставлении с известными результатами, а также с экспериментами на фотоупругих материалах.

Основные результаты диссертации, выводы и положения, выносимые на защиту, опубликованы в рецензируемых изданиях, индексируемых в международных базах Web of Science и SCOPUS, указанных в перечне ВАК для докторских диссертаций, и апробированы на международных и всероссийских конфе-

ренциях высокого уровня, включая Генеральные Ассамблеи Европейского Союза Геофизиков. Из общего числа 42 работ, опубликованных по теме диссертации, 13 выполнены без соавторов.

Выводы

Диссертация Галыбина Александра Николаевича выполнена на актуальную тему, обладает научной новизной и содержит решение задач реконструкций полей упругих напряжений по экспериментальным данным об индикаторах напряжений, которые имеют существенное значение для геомеханического обеспечения горных работ и для более глубокого понимания геофизических процессов, происходящих в земной коре. В диссертации разработаны теоретические положения, совокупность которых можно квалифицировать как научное достижение.


Содержание автореферата соответствует содержанию диссертации. Диссертационная работа соответствует установленным п. 9 Положения о присуждении учёных степеней (утверждено постановлением Правительства Российской Федерации от 24 сентября 2013 г. № 842) для учёной степени доктора наук. Ее автор А.Н. Галыбин заслуживает присуждения учёной степени доктора физико-математических наук.

Я, Ревуженко Александр Филиппович, даю согласие на включение своих персональных данных в документы, связанные с работой диссертационного совета, и их дальнейшую обработку.

Официальный оппонент

заведующий лабораторией механики деформируемого твердого тела и сыпучих сред Федерального государственного бюджетного учреждения науки «Институт горного дела им. Н.А. Чинакала Сибирского отделения Российской академии наук»,

Заслуженный деятель науки РФ
доктор физико-математических наук,
профессор

 Ревуженко Александр Филиппович

г. Новосибирск, 630000, Красный проспект, 54 ИГД СО РАН

26 апреля 2017 г.

Подпись зав. лаб. ИГД СО РАН, проф. А.Ф. Ревуженко заверяю:

Учёный секретарь ИГД СО РАН, кт.н.  А.П. Хмелинин

