

## ОТЗЫВ

официального оппонента на диссертацию  
Фукалова Антона Александровича  
по теме «Задачи о равновесии упругих  
трансверсально-изотропных центрально-симметричных тел:  
аналитические решения и их приложения»,  
представленную на соискание ученой степени  
кандидата физико-математических наук  
по специальности 1.1.8. Механика деформируемого твердого тела

**Актуальность темы.** Диссертация А. А. Фукалова посвящена решению задач аналитического определения напряженно-деформированного состояния анизотропных сплошных и составных сферических толстостенных конструкций, которые находят широкое применение в различных отраслях промышленности, строительстве, геологии, на предприятиях аэрокосмического и нефте-газо-химического комплексов.

**Целью диссертационного исследования** является получение новых аналитических решений задач для упругих трансверсально-изотропных центрально-симметричных тел.

**Научная новизна, теоретическая и практическая значимость исследований.** В диссертации А. А. Фукаловым представлены результаты, обладающие научной новизной, имеющие теоретическую и практическую значимость:

1. Получены новые аналитические решения задач о равновесии тяжелых полых и составных упругих трансверсально-изотропных сфер, находящихся под действием внутреннего или внешнего давления, с жестко закрепленной или закрепленной в радиальном направлении (с идеальным скольжением без трения) внешней или внутренней поверхностью соответственно; определение вклада массовых сил в распределение независимых инвариантов тензора напряжений в поперечных сечениях;
2. Получены новые аналитические решения задач о равновесии составных толстостенных тел, состоящих из двух посаженных с натягом упругих трансверсально-изотропных сфер с общим центром и нагруженных внешним и внутренним равномерным давлениями;
3. Выявлены закономерности совместного деформирования крепи сферической подземной выработки и окружающего массива осадочных пород и фрагментированных сыпучих сред, а также внутренней и внешней частей составных сосудов давления; определено влияние параметров анизотропии материала на характер распределения инвариантов тензора напряжений в поперечных сечениях; оценки исчерпания несущей способности по совокупности критериев, учитывающих различные механизмы разрушения, характерные для трансверсально-изотропных материалов;



4. Выполнено прогнозирование эффективных модулей объемного сжатия в рамках полидисперсных моделей механики композитов и двухфазных дисперсно-упрочненных материалов, изотропная матрица которых содержит однородно распределенные трансверсально-изотропные сплошные или полые сферические включения.

#### **Обоснованность и достоверность научных положений и выводов.**

Обоснованность и достоверность полученных результатов обусловлена применением в исследовании корректного использования аппарата математической теории упругости, численных методов решения задач механики деформируемого твердого тела (метод конечных элементов), аналитических методов прогнозирования эффективных упругих модулей дисперсно-упрочненных композитов матричного типа (в рамках полидисперсных моделей), методов решения краевых задач математической физики и корректным сравнением частных случаев полученных аналитических решений с аналитическими, численными и экспериментальными результатами других авторов. Результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на многочисленных конференциях и научных семинарах.

**Краткая характеристика основного содержания диссертации.** Диссертация А. А. Фукалова состоит из введения, трех глав, заключения и списка литературы из 125 наименований.

**Во введении** представлен краткий обзор, отражающий современное состояние вопросов исследования, сделано заключение о научной новизне и актуальности темы, сформулированы цель и задачи диссертационной работы, новые научные результаты и положения, выносимые на защиту; описаны методология и методы диссертационного исследования, приведено краткое описание содержания диссертации по главам, приведены сведения об апробации и публикациях по теме диссертации, указан личный вклад автора.

**В первой главе** приведены основные уравнения теории упругости в ортогональной сферической системе координат  $\rho$ ,  $\theta$  и  $\varphi$ . Рассмотрена линейно-упругая тяжелая сфера (центр совпадает с началом системы координат), ограниченная поверхностями радиусов  $\rho_1$  и  $\rho_2$  ( $\rho_1 < \rho_2$ ), находящаяся в состоянии равновесия в поле гравитационных сил. Получены новые аналитические решения задач о равновесии тяжелых упругих трансверсально-изотропных центрально-симметричных тел. Проведено сравнение полученного нового аналитического решения задачи о равновесии тяжелой толстостенной трансверсально-изотропной сферы с жестко закрепленной внешней поверхностью с численно определенными в пакетах ANSYS 13.0 и ABAQUS 6.11 перемещениями, деформациями и напряжениями, показавшее хорошее количественное соответствие конечно-элементных результатов, представленных в инвариантной форме (максимальная погрешность не превышает 2 %). Для проведения сравнения аналитических расчетов с



результатами численных экспериментов были выполнены дополнительные преобразования по их переводу в инвариантный вид.

Во второй главе получены новые аналитические решения задач о равновесии упругих трансверсально-изотропных составных тяжелых центрально-симметричных тел, нагруженных внутренним или внешним давлениями при условии полного (в радиальном и меридиональном направлении) и частичного (только вдоль радиальной координаты с сохранением возможности идеального скольжения без трения) закрепления внешней или внутренней поверхности. Выполнена многокритериальная оценка прочности монолитных железобетонных крепей сферических горных выработок, находящихся в массиве осадочных или сыпучих пород.

Третья глава посвящена получению новых аналитических решений задач о равновесии (без учета массовых сил) упругих толстостенных составных трансверсально-изотропных сфер, находящихся под действием равномерных внутреннего и внешнего давлений. С использованием полученного аналитического решения выполнено прогнозирование эффективных упругих модулей дисперсно-упрочненного композита со сплошными и полыми анизотропными сферическими включениями.

В целом диссертация А. А. Фукалова является законченным исследованием, представляет решение актуальных задач, объединенных общим подходом, обеспечивающим возможность выполнять анализ влияния вклада массовых сил в распределение независимых инвариантов тензора напряжений в поперечных сечениях тяжелых трансверсально-изотропных сфер проводить количественные оценки совместного деформирования крепи и окружающего массива осадочных пород и прочности монолитной железобетонной крепи сферической подземной выработки по совокупности рассматриваемых в диссертации критериев; решать задачи повышения эффективности составных сферических сосудов давления на стадии их проектирования за счет управления напряженным состоянием; выполнять анализ влияния фазового состава полимерной матрицы и минерального наполнителя на эффективные деформационные свойства полимербетонов.

Высокая ценность работы заключается в получении точных аналитических решений, которые можно отнести к фундаментальным результатам в механике деформируемого твердого тела. Работа выполнена с большой изобретательностью, скрупулезностью и тщательностью; прекрасно оформлена и проиллюстрирована.

**Замечания по работе.** К содержанию работы могут быть сделаны следующие замечания:

1. В работе при описании напряженного состояния упругих трансверсально-изотропных тел используются инварианты тензора напряжений относительно группы ортогональных преобразований. На стр. 32 утверждается, что «сравнение инвариантов со своими критическими значениями может



позволить провести оценку возможности реализации следующих механизмов разрушения...». Далее обсуждаются возможные механизмы разрушения железобетонной крепи. Однако, величины критических значений инвариантов в принятой феноменологической теории прочности не приводятся и указаний на способы их получения нет.

2. На стр. 58 и стр. 62 описывается алгоритм получения постоянных интегрирования, однако сами постоянные не приводятся «ввиду их громоздкости». Целесообразно было для полноты аналитического решения привести эти константы в приложении.

3. Насколько корректно применение предложенного метода определения эффективного модуля объемного сжатия полимербетона, армированного гранитными включениями? Эти включения не являются сферическими, как это видно по приведенной на стр.92 фотографии структуры полимербетона.

### **Общее заключение.**

Результаты исследования **прошли апробацию** на 10 Международных конференциях, 18 Всероссийских конференциях и школах. Докладывались на 10 научных семинарах в ведущих академических учреждений страны с участием ведущих специалистов в области механики деформированного тела.

**Научные результаты** диссертационной работы **полностью опубликованы** в монографии, 4 статьях в журналах, входящих в базы цитирования Web of Science , 2 статьях в журналах, входящих в базы цитирования Scopus; 3 статьях в журналах из перечня, рекомендованного ВАК РФ; в 25 статьях и тезисах докладов Всероссийских и Международных конференций.

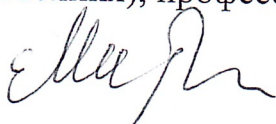
**Автореферат** и опубликованные работы **полно отражают содержание диссертации**, характеризуют результаты проведенных исследований

Уровень решаемых задач соответствует требованиям ВАК РФ, предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук. **Содержание диссертации соответствует шифру** специальности 1.1.8. Механика деформируемого твердого тела.

Диссертационное исследование Фукалова Антона Александровича «Задачи о равновесии упругих трансверсально-изотропных центрально-симметричных тел: аналитические решения и их приложения» является завершенной научно-квалификационной работой, которая по критериям актуальности, научной новизны, теоретической и практической значимости, обоснованности и достоверности научных положений и выводов соответствует «Положению о присуждении ученых степеней ВАК Минобрнауки РФ», утвержденного постановлением Правительства РФ № 842 от 24.09.2013 г.

Фукалов Антон Александрович заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.1.8. Механика деформируемого твердого тела.

Официальный оппонент,  
профессор кафедры  
«Металлургические и роторные машины»  
Федерального государственного  
автономного образовательного учреждения  
высшего образования  
«Уральский федеральный университет  
имени первого Президента России Б.Н. Ельцина»,  
доктор физико-математических наук (01.04.07 – физика  
конденсированного состояния), профессор



Митюшов Евгений Александрович

22 ноября 2022 г.

Служебный адрес: Екатеринбург, ул. Мира, 19  
Служебный телефон: +7 (343) 3758694  
e-mail: mitushov@urfu.ru

Подпись Евгения Александровича Митюшова заверяю, ученый секретарь  
Морозова Вера Анатольевна

