

ЗАКЛЮЧЕНИЕ ДИССЕРТАЦИОННОГО СОВЕТА Д 004.036.01 НА БАЗЕ  
ФЕДЕРАЛЬНОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО БЮДЖЕТНОГО УЧРЕЖДЕНИЯ НАУКИ  
ПЕРМСКИЙ ФЕДЕРАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ЦЕНТР  
(ФИЛИАЛ – ИНСТИТУТ МЕХАНИКИ СПЛОШНЫХ СРЕД)  
УРАЛЬСКОГО ОТДЕЛЕНИЯ РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК  
ПО ДИССЕРТАЦИИ НА СОИСКАНИЕ УЧЕНОЙ СТЕПЕНИ КАНДИДАТА НАУК

аттестационное дело № \_\_\_\_\_  
решение диссертационного совета от 22.12.2022 № 109

О присуждении Фукалову Антону Александровичу, гражданину России, ученой степени кандидата физико-математических наук.

**Диссертация** «Задачи о равновесии упругих трансверсально-изотропных центрально-симметричных тел: аналитические решения и их приложения» по специальности 1.1.8 – «Механика деформируемого твёрдого тела» принята к защите 20.10.2022, протокол № 103, диссертационным советом Д 004.036.01 на базе Федерального государственного бюджетного учреждения науки Пермский федеральный исследовательский центр (филиал – Институт механики сплошных сред) Уральского отделения Российской академии наук, 614013, г. Пермь, ул. Академика Королева, д. 1, утвержденным приказом Минобрнауки России № 87/нк от 26 января 2018.

**Соискатель** Фукалов Антон Александрович 1987 г. рождения, в 2011 г. окончил ГОУ ВПО «Пермский государственный технический университет» по направлению «Материаловедение и технология новых материалов». В 2014 г. окончил аспирантуру очной формы обучения в ФГБОУ ВПО «Пермский национальный исследовательский политехнический университет» по научной специальности 01.02.04 – Механика деформируемого твёрдого тела. Диссертация выполнена на кафедре механики композиционных материалов и конструкций ФГАОУ ВО «Пермский национальный исследовательский политехнический университет» (ПНИПУ). В настоящее время соискатель работает старшим преподавателем кафедры механики композиционных материалов и конструкций ФГАОУ ВО ПНИПУ.

**Научный руководитель** – к.ф.-м.н., доцент кафедры механики композиционных материалов и конструкций Зайцев Алексей Вячеславович.

**Официальные оппоненты:**

1. Митюшов Евгений Александрович, доктор физико-математических наук (01.04.07), профессор, профессор кафедры металлургических и роторных машин ФГАОУ ВО «Уральский федеральный университет им. первого Президента России Б.Н. Ельцина», г. Екатеринбург;
2. Паршин Дмитрий Александрович, кандидат физико-математических наук (01.02.04), старший научный сотрудник лаборатории моделирования в механике деформируемого твердого тела ФГБУН «Институт проблем механики им. А.Ю. Ишлинского Российской академии наук», г. Москва;

дали положительные отзывы на диссертацию

**Ведущая организация:** Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Самарский государственный технический университет» (СамГТУ), г. Самара, в своем положительном заключении, составленным д.ф.-м.н.,

профессором В.П. Радченко, заведующим кафедрой прикладной математики и информатики, и утвержденном первым проректором – проректором по научной работе СамГТУ, д.т.н., профессором М.В. Ненашевым, указала, что диссертация представляет собой законченную научно-исследовательскую работу в области решения новых краевых задач исследования напряжённо-деформированного состояния для упругих трансверсально-изотропных центрально-симметричных тел с учётом массовых гравитационных сил и их приложений в различных отраслях промышленности. Тематика исследований актуальная и востребованная и с фундаментальных позиций, и с точки зрения их прикладного значения в различных областях хозяйственной деятельности. Полученные результаты достоверны, выводы и умозаключения обоснованы. Работа базируется на достаточном объеме полученных теоретических результатов и вносит существенный вклад в решение теоретических и прикладных вопросов механики деформируемого твердого тела. Представленная диссертационная работа «Задачи о равновесии упругих трансверсально-изотропных центрально-симметричных тел: аналитические решения и их приложения» удовлетворяет требованиям Положения «О присуждении ученых степеней», утвержденного Постановлением правительства РФ №842 от 24.09.2013, предъявляемым к кандидатским диссертациям, а ее автор Фукалов Антон Александрович заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.1.8 – «Механика деформируемого твёрдого тела».

**Соискателем опубликовано** 9 статей в ведущих рецензируемых журналах, входящих в перечень, рекомендованный ВАК:

1. Зайцев А.В., **Фукалов А.А.** Упругое равновесие тяжелой трансверсально-изотропной толстостенной сферы с жестко закрепленной внутренней поверхностью // Вестник Самарского гос. техн. ун-та. Физико-математические науки. 2010. № 5(21). С. 85-95.

*Получено новое аналитическое решение задачи о равновесии упругой трансверсально-изотропной толстостенной сферы с жестко закрепленной внутренней поверхностью, находящейся под действием массовых сил и внешнего равномерного давления.*

2. Зайцев А.В., **Фукалов А.А.** Эффективные модули объемного сжатия дисперсно-упрочненных композитов со сплошными и полыми анизотропными сферическими включениями // Вестник ПНИПУ. Механика. 2010. № 4. С. 46-54.

*В рамках полидисперсной модели получены новые аналитические выражения для эффективных модулей объемного сжатия двухфазных дисперсно-упрочненных композитов, изотропная матрица которых содержит однородно распределенные анизотропные сплошные или полые сферические включения.*

3. **Фукалов А.А.**, Кутергин А.В. Точные аналитические решения задач о равновесии упругих анизотропных тяжелых тел с центральной и осевой симметрией и их приложения // Вестник Нижегородского ун-та им. Н.И. Лобачевского. 2011. № 4-4. С. 1831-1833.

*Получены новые аналитические решения задач о равновесии полых и составных толстостенных тяжелых трансверсально-изотропных сфер, жестко закрепленных по внутренней или внешней поверхности и находящихся под действием равномерного внешнего или внутреннего давления.*

4. Зайцев А.В., Соколкин Ю.В., **Фукалов А.А.** Механизмы начального разрушения железобетонной крепи сферической горной выработки в массиве осадочных пород // Вестник ПНИПУ. Механика. 2013. № 4. С. 59-74.

*В работе получено новое аналитическое решение задачи для составной трансверсально-изотропной сферы с жестко закрепленной внешней поверхностью, находящейся в равновесии под действием массовых сил и однородного внутреннего давления.*

5. Зайцев А.В., Соколкин Ю.В., **Фукалов А.А.** Равновесие жестко закрепленных по внешней поверхности тяжелых упругих анизотропных тел с центральной симметрией в поле гравитационных сил // Вестник Кыргызско-Российского славянского ун-та. 2017. Т 17, № 8. С. 13-17.

*Получено новое аналитическое решение задачи о равновесии толстостенного тяжелой трансверсально-изотропной сферы, жестко закрепленной по внешней поверхности и находящегося под действием равномерного внутреннего давления и гравитационных сил.*

6. Zaitsev A.V., Sokolkin Yu.V., **Fukalov A.A.** Initial strength analysis of anisotropic concrete supports for spherical mine workings in a sedimentary rock mass // Physical and mathematical modeling of Earth and environment processes (2018): 4th Int. Sci. School for Young Scientists, Ishlinskii Institute for Problems in Mechanics of RAS / Eds. V.I. Karev, D. Klimov, K. Pokazeev. Cham: Springer Nature Switzerland AG/Springer, 2019. P. 463-471.

*На основе полученных аналитических решений задач о равновесии составных толстостенных тяжелых трансверсально-изотропных сфер, жестко закрепленных по внешней поверхности и находящихся под действием равномерного внутреннего давления, представлены результаты многокритериальной оценки прочности крепей подземных выработок с учетом влияния окружающего массива осадочных пород.*

7. Зайцев А.В., Соколкин Ю.В., **Фукалов А.А.** Решение задачи Ламе для составных трансверсально-изотропных сфер с общим центром // Вестник Сам. гос. техн. ун-та. Физико-математические науки. 2021. Т. 25, № 1. С. 83-96.

*Проанализировано влияние анизотропии материалов и величины давления натяга на распределение напряжений в поперечных сечениях составных сферических сосудов давления. Показана возможность «управления» величинами и характером распределения напряжений в составных конструкциях, оптимально соответствующих заданным режимам эксплуатации.*

8. **Фукалов А.А.**, Зайцев А.В., Соколкин Ю.В., Баяндин Ю.В. Равновесие жесткозакрепленной на внешней поверхности полой трансверсально-изотропной толстостенной сферы, находящейся под действием равномерного внутреннего давления и гравитационных сил // Вестник Сам. гос. техн. ун-та. Физико-математические науки. 2021. Т. 25, № 2. С. 303-319.

*Получено аналитическое решение задачи о равновесии составной трансверсально-изотропной сферы, находящейся под действием равномерных внешнего и внутреннего давлений. Проведено качественное и количественное сравнение с результатами численного решения той же задачи в конечноэлементном пакете ANSYS 13.0.*

9. Zaitsev A.V., Kutergin A.V., **Fukalov A.A.**, Votinov A.S., Kolytchev I.Yu. Initial strength analysis of reinforced concrete monolithic supports for spherical and cylindrical mine workings // IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science. 2022. Vol. 1021. Art. id. № 012060.

*На основе многокритериального подхода и аналитического решения задачи о равновесии тяжелой толстостенной трансверсально-изотропной сферы определены области железобетонной крепи горной выработки, в которых может быть инициировано разрушение.*

Публикации в сумме содержат 90 страниц и в полной мере отражают основные научные результаты диссертации. Недостоверные сведения об опубликованных соискателем работах в тексте диссертации отсутствуют.

**На диссертацию и автореферат поступили отзывы:** от оппонентов и ведущей организации.

1. Положительный отзыв официального оппонента Е. А. Митюшова. В отзыве отмечены актуальность темы диссертации, научная новизна, теоретическая и практическая значимость, обоснованность и достоверность научных положений и выводов; представлена характеристика содержания диссертации по главам. Оппонент отмечает следующие замечания по диссертации и автореферату:

- замечание по поводу отсутствия величин критических значений инвариантов тензора напряжений и указаний на способы их получения;
- рекомендация записи постоянных интегрирования, которые не приведены в тексте рукописи «ввиду их громоздкости», в приложении;
- вопрос о корректности применения предложенного метода определения эффективного модуля объемного сжатия полимербетона с гранитными включениями, имеющими не сферическую форму;

2. Положительный отзыв официального оппонента Д. А. Паршина. В отзыве отмечено, что решен ряд новых, не исследованных ранее в рассмотренных постановках, задач механики деформируемого твердого тела и применении полученных новых решений для проведения оригинальных изысканий по предсказанию условий и характера работы, оценке состояния и прогнозированию свойств ряда технических конструкций, строительных сооружений, природных объектов и конструкционных материалов. Оппонент отмечает следующие замечания:

- замечание относительно описок, неточных высказываний и терминологических вольностей в тексте;
- замечание относительно разной возможности сопротивления растяжению и сжатию рассматриваемых геоматериалов и железобетона;
- замечание об отсутствии давления на внешней поверхности слоя горной породы, окружающего жесткую крепь, и об обосновании величины внешнего радиуса этого слоя;
- замечание о том, что некоторые отмеченные в работе особенности решений являются следствием частных условий нагружения и закрепления;
- замечание о возможности наступления критического состояния, связанного с недопустимо высоким значением максимального касательного напряжения для случая изотропного поведения одной из составляющих частей составного сосуда давления;
- замечание о непонятном высказывании про появление ненулевых «технологических» напряжений только на поверхности контакта при натяге двух составных частей сосуда;
- замечание об исследовании влияния натяга при сборке состоящих из двух частей сосудов давления с одинаковыми упругими свойствами и об оставлении без внимания более общего и интересного с практической точки зрения случая составного сосуда из двух различных материалов;
- рекомендация использования в иллюстрациях компоненты тензора напряжений, а не инварианты, с явным указанием на соответствие между ними.

3. Положительный отзыв ведущей организации ФГБОУ ВО СамГТУ. В отзыве отмечается, что диссертация представляет собой завершённую научно-исследовательскую работу, посвящённую решению новых краевых задач исследования напряжённо-деформированного состояния упругих трансверсально-изотропных центрально-симметричных тел с учётом массовых гравитационных сил и их приложений в различных отраслях промышленности. Полученные результаты имеют как фундаментальное значение, так и существенную практическую значимость. Ведущая организация отмечает следующие замечания:

- замечание об отсутствии самостоятельного раздела «Аналитический обзор» с четким логическим обоснованием перехода к постановке задач диссертационного исследования;
- замечание по оформлению списка литературы;
- замечание по объяснению выбора необходимости использования бесконечного ряда полиномов Лежандра, в то время как при получении решений краевых задач используются лишь нулевой и первый член разложения;
- замечание о неточной формулировке гипотез, соответствующих условиям на границе контакта составных сосудов давления;
- вопрос о том, являются ли лицензионными конечноэлементные пакеты, использованные при численном решении задачи;
- замечание об отсутствии пояснения, почему при численном решении не рассмотрен более общий случай в пункте 1.3 при ненулевом внутреннем давлении;
- замечание относительно опечаток и неточностей в тексте.

**На автореферат поступило 10 отзывов:**

1. Положительный отзыв от С.А. Берестовой, д.ф.-м.н., доцента, заведующего кафедрой теоретической механики ФГАОУ ВО «Уральский федеральный университет им. Первого президента России Б.Н. Ельцина», г. Екатеринбург (1 замечание);
2. Положительный отзыв от Г.Н. Кувыркина, д.ф.-м.н., профессора, заведующего кафедрой прикладной математики; И.К. Марчевского, д.ф.-м.н., доцента, профессора кафедры прикладной математики, ФГБОУ ВО «Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана», г. Москва (2 замечания);
3. Положительный отзыв от С.А. Лычева, д.ф.-м.н., доцента, ведущего научного сотрудника ФГБУН «Институт проблем механики им. А.Ю. Ишлинского РАН», г. Москва (3 замечания);
4. Положительный отзыв от Б.А. Люкшина, д.т.н., профессора, заведующего кафедрой механики и графики ФГБОУ ВО «Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники»; С.В. Панина, д.т.н., профессора РАН, профессора отделения материаловедения Инженерной школы новых производственных технологий ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский Томский политехнический университет», г. Томск (1 замечание);
5. Положительный отзыв от Л.А. Назаровой, д.ф.-м.н., главного научного сотрудника лаборатории горной информатики ФГБУН «Институт горного дела им. Н.А. Чинакала СО РАН», г. Новосибирск (2 замечания);
6. Положительный отзыв от И.С. Павлова, д.ф.-м.н., доцента, заместителя директора по научной работе Института проблем машиностроения РАН, ФГБУН ФИЦ «Институт прикладной физики РАН», г. Нижний Новгород (2 замечания);

7. Положительный отзыв от С.Б. Сапожникова, д.т.н., профессора, профессора кафедры «Техническая механика» ФГАОУ ВО «Южно-Уральский государственный университет (национальный исследовательский университет)», г. Челябинск (1 замечание);
8. Положительный отзыв от И.Ю. Смолина, д.ф.-м.н., доцента, заведующего лабораторией нелинейной механики метаматериалов и многоуровневых систем ФГБУН «Институт физики прочности и материаловедения СО РАН», г. Томск (без замечаний);
9. Положительный отзыв от К.Б. Устинова, д.ф.-м.н., доцента, ведущего научного сотрудника лаборатории геомеханики ФГБУН «Институт проблем механики им. А.Ю. Ишлинского РАН», г. Москва (3 замечания);
10. Положительный отзыв от С.В. Шешенина, д.ф.-м.н., профессора, профессора кафедры теории пластичности ФГБОУ ВО «Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова», г. Москва (1 замечание).

**В отзывах на автореферат содержатся следующие замечания:**

- вопрос о сравнении полученных аналитических решений с численными решениями других авторов;
- замечание о верхней границе объемного наполнения полимербетонов, при которых полученные в главе 3 результаты остаются корректными;
- замечания о необходимости получения оценок и для других упругих характеристик полимербетонов, помимо модуля объемного сжатия;
- вопрос об оценке погрешности вычислений при усечении бесконечных рядов до частичных сумм при неоднородных граничных условиях;
- рекомендация записать представления решений в форме разложения по полиномам Лежандра с помощью рекуррентных соотношений для удобства их практического использования;
- замечание о необходимости пояснить, как можно использовать полученные решения для задач создания новых конструкций;
- замечание относительно сходимости решения представимого бесконечным рядом по полиномам Лежандра;
- замечание относительно используемых критериев прочности и устойчивости;
- замечание о том, что рассмотренные краевые условия в задачах не в полной мере соответствуют реальным условиям работы монолитных крепей сферических горных выработок и не в полной мере демонстрируют возможности полученных решений;
- замечание о неупругом поведении рассматриваемых материалов;
- вопрос относительно коэффициентов частного решения в изотропном случае, с необходимостью объяснения, почему в таком виде они не могли быть выписаны ранее;
- замечание об отсутствии объяснения в автореферате (есть только в тексте диссертации), какие критерии рассматриваются при многокритериальной оценке;
- замечание относительно пояснения, в рамках какой модели получены выражения для модуля объемного сжатия материала, изотропная матрица которого армирована сплошными либо полыми анизотропными включениями;
- замечание о решении, записанном формулами (4), (6) автореферата, которое следует называть не просто аналитическим, а решением в рядах с использованием полиномов Лежандра.

В отзывах отмечено, что диссертация является законченным исследованием и представляет научный интерес, прошла достаточную апробацию, содержит новые результаты, достоверность которых обоснована; тема диссертации является актуальной, результаты имеют высокую научную ценность и большое прикладное значение.

Выбор оппонентов и ведущей организации обосновывается следующим:

**официальные оппоненты** являются одними из ведущих специалистов в области механики деформируемого твердого тела, механики растущих тел, механики композитов и сред со структурой и текстурой, имеют большое число публикации с теоретическими результатами; обладают достаточной квалификацией, позволяющей оценить новизну представленных на защиту результатов, их научную и практическую значимость, обоснованность и достоверность полученных выводов;

**ведущая организация** ФГБОУ ВО «Самарский государственный технический университет», г. Самара, является одним из ведущих научных центров в области механики деформируемого твёрдого тела. Основные направления научной деятельности университета: естественные и технические науки по направлениям «Дифференциальные уравнения и математическая физика», «Механика деформируемого твёрдого тела», «Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ». Университет выпускает журнал «Вестник самарского государственного технического университета. Серия: физико-математические науки», включенный в перечень ВАК РФ и международные базы WoS и Scopus. Отзыв ведущей организации, содержащий подробную, по главам, характеристику содержания диссертационной работы; высокую положительную оценку актуальности темы исследования, достоверности, новизны, теоретической и практической значимости изложенных результатов обсужден и одобрен на расширенном заседании кафедры прикладной математики и информатики СамГТУ, протокол № 4 от 17.11.2022 г., в присутствии признанных авторитетных специалистов по теме защищаемой диссертации.

**Диссертационный совет отмечает, что на основании выполненных соискателем исследований:**

**предложено** аналитическое решение задачи о равновесии упругой трансверсально-изотропной толстостенной сферы под действием осесимметричной нагрузки при различных условиях закрепления;

**разработаны** методики расчета напряженно-деформированного состояния сферических композитных конструкций под действием центрально-симметричной нагрузки, а также прогнозирования эффективных упругих свойств двухфазных матричных композитов, наполненных сплошными или полыми анизотропными сферическими включениями.

**Теоретическая значимость исследования обоснована тем, что:**

**применительно к проблематике диссертации результативно (эффективно, то есть с получением обладающих новизной результатов):**

**использован** метод рядов для решения задачи о равновесии упругой трансверсально-изотропной толстостенной сферы под действием осесимметричной нагрузки при различных условиях закрепления;

**изучена** зависимость напряженно-деформированного состояния упругих трансверсально-изотропных композитных сферических конструкций от параметров анизотропии и давления натяга;

**изучена** зависимость эффективного объемного модуля матричных композитов, наполненных трансверсально-изотропными сплошными либо полыми анизотропными сферическими включениями, от типа частиц армирующего наполнителя;

**раскрыта** возможность изменения напряженного состояния и функциональных свойств композитных материалов и конструкций в благоприятном направлении путем рационального выбора параметров анизотропии сферических структурных элементов.

**Значение полученных соискателем результатов исследования для практики подтверждается тем, что:**

**определены** закономерности совместного деформирования крепей сферических подземных горных выработок и окружающего породного массива и проведена оценка возможной потери несущей способности на основе многокритериального подхода, учитывающего различные механизмы разрушения трансверсально-изотропных материалов;

**создана** теоретическая база для описания взаимодействия внутренней и внешней частей составных трансверсально-изотропных центрально-симметричных тел;

**показано** влияние соотношения показателей анизотропии и величины технологического давления натяга на характер распределения напряжений и возможность управления напряженным состоянием и функциональными свойствами материалов при проектировании составных сферических сосудов давления;

**представлены** зависимости эффективного модуля объемного сжатия полимербетона, наполненного минеральной мукой и частицами наполнителя, от состава матрицы.

**Оценка достоверности результатов исследования выявила:**

**использованы** общепринятые гипотезы и известные методы теории упругости, математической физики и механики композиционных материалов;

**проведено** сравнение полученных аналитических решений с известными частными случаями;

**установлено** соответствие полученных результатов в рассмотренных частных случаях известным и апробированным.

**Личный вклад соискателя состоит в** получении аналитического решения задачи о равновесии упругой анизотропной толстостенной сферы под действием осесимметричной нагрузки, проведении анализа напряженно-деформированного состояния составных сферических конструкций, определении эффективных упругих свойств матричного композита, наполненного анизотропными сплошными или полыми сферическими включениями, непосредственном участии в подготовке публикаций по теме диссертации и апробации результатов исследования на конференциях и семинарах.

**Диссертация охватывает основные вопросы поставленной научной задачи (проблемы) и соответствует критерию внутреннего единства, что подтверждается** последовательностью решения рассматриваемых задач для композитных конструкций, включающих в себя анизотропную упругую толстостенную сферу в качестве структурного элемента.

Диссертационный совет пришел к выводу о том, что диссертация представляет собой законченную научно-квалификационную работу, которая соответствует требованиям п. 9 «Положения о присуждении ученых степеней» № 842, утвержденного Постановлением Правительства Российской Федерации от 24 сентября 2013 г.: в ней содержится решение задачи построения ряда новых аналитических решений задач линей-

ной теории упругости для трансверсально-изотропных однородных и кусочно-неоднородных по радиальной координате тел, ограниченных сферическими поверхностями, находящихся в равновесии под действием осесимметричной нагрузки с центрально-симметричными условиями закрепления, и их применения в различных прикладных задачах.

На заседании 22 декабря 2022 г. диссертационный совет принял решение присудить Фукалову А.А. ученую степень кандидата физико-математических наук.

При проведении тайного голосования диссертационный совет в количестве 14 человека, из них 6 докторов наук по специальности рассматриваемой диссертации, участвовавших в заседании, из 21 человека, входящего в состав совета, дополнительно введено на разовую защиту 0 человек, проголосовали: за – 14, против – 0, недействительных бюллетеней – 0.

Председатель  
диссертационного совета Д 004.036.01  
д.т.н., профессор, академик РАН  
Матвеев Валерий Павлович

 / В.П. Матвеев

Ученый секретарь  
диссертационного совета Д 004.036.01  
д.ф.-м.н., доцент  
Зуев Андрей Леонидович

  
/ А.Л. Зуев

М.П.



23 декабря 2022 г.