

О Т З Ы В
официального оппонента о диссертационной работе
Фукалова Антона Александровича
«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

На отзыв представлены:

- диссертационная работа на 112 страницах машинописного текста, включающая 19 рисунков и 2 таблицы;
- автореферат диссертации на 16 страницах, включающий список из 10 публикаций автора по теме диссертации (в числе которых 3 статьи — в журналах из перечня, рекомендованного ВАК РФ, и 6 статей — в журналах, индексируемых международными базами цитирования Web of Science Core Collection и Scopus, а также 1 монография).

Проблематика исследований и их актуальность. Диссертационная работа Фукалова Антона Александровича посвящена:

- построению ряда новых аналитических решений задач линейной теории упругости для анизотропных однородных и кусочно-неоднородных по радиальной координате тел, ограниченных сферическими поверхностями и обладающих сферической симметрией упругих свойств, в центрально-симметричных условиях закрепления и поверхностного нагружения, при одновременном действии однородного поля сил тяжести;
- демонстрации некоторых возможных эффективных применений полученных решений в различных прикладных задачах механики.

Данные исследования являются, безусловно, актуальными ввиду чрезвычайно широкого распространения разного рода сферических элементов в современных технических конструкциях и строительных сооружениях, деталях машин и механизмов, а также в структуре современных многофазных материалов, проектирование, создание, анализ работы и оценка функциональных свойств которых требуют как достаточно точных в

количественном отношении механических расчетов, так и детального понимания качественных особенностей напряженно-деформированного состояния этих элементов. Кроме того, актуальность выполненных исследований определяется потребностью инструментально-методической теоретической базы специальных разделов механики деформируемого твердого тела, таких как, например, механика растущих тел, в точных аналитических решениях уравнений математической теории упругости, особенно острой в случае присутствия у используемых материалов анизотропии механических свойств, для анализа возникающих в этих разделах задач и эффективного конструирования их решений.

Краткое содержание работы. Диссертационная работа состоит из введения, трех глав, заключения и списка литературы; изложена на 112 страницах машинописного текста, содержит 19 рисунков и 2 таблицы; список литературы состоит из 125 наименований.

Во введении представлен краткий обзор истории развития и современного состояния вопросов, связанных с тематикой диссертации, охарактеризованы актуальность ее темы и научная новизна полученных в ней результатов, сформулированы цель и задачи диссертационных исследований, описана их методология, перечислены положения, выносимые на защиту, и их апробация, даны краткое описание содержания глав диссертации и сведения о публикациях автора по теме диссертации, отмечен его личный вклад в них.

В первой главе получены новые аналитические решения задач о равновесии тяжелых трансверсально-изотропных центрально-симметричных тел, закрепленных по внешней или внутренней поверхности и находящихся под действием массовых сил и, соответственно, равномерного внутреннего или внешнего давления. Полученные решения применены к оценке прочности железобетонных крепей сферических подземных выработок, а также прочности окружающего жесткую крепь породного массива по совокупности критериев.

Во второй главе получены новые аналитические решения задач о равновесии упругих трансверсально-изотропных составных тяжелых сфер, нагруженных равномерным давлением по одной своей граничной поверхности, при условии полного закрепления или идеального скольжения без вдавливания на другой. Проанализированы закономерности совместного деформирования крепей сферических подземных горных выработок и окружающего их массива

горных пород, проведена оценка прочности по совокупности критериев.

В третьей главе получены новые аналитические решения задач о равновесии упругих толстостенных составных трансверсально-изотропных сферических тел, находящихся под действием равномерного внутреннего и внешнего давления. На основании полученного решения проанализировано влияние показателя анизотропии материалов двух частей сосудов давления, а также величины технологического натяга, вызванного их посадкой, на характер распределения напряжений. Представлены также результаты применения полученных решений к прогнозированию эффективных упругих свойств дисперсно-упрочненных композитов со сплошными и полыми анизотропными сферическими включениями в рамках полидисперсной схемы армирования.

В заключении сформулированы основные результаты диссертационной работы и рекомендации по их возможному практическому применению; показаны перспективы дальнейшей разработки темы диссертации.

Научная новизна полученных в диссертации результатов состоит в решении ряда 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 соответствующих технических конструкций, строительных сооружений, природных объектов и конструкционных материалов на основе их построенных в работе новых математических моделей.

Достоверность результатов диссертационных исследований и обоснованность выводов, сделанных автором на основании этих результатов, подтверждаются:

- корректным использованием методологии и математического аппарата механики сплошной среды, в частности, линейной теории упругости, механики композиционных материалов;
- строгой постановкой краевых задач математической физики, соответствующих разрабатываемым в работе моделям механики;
- грамотным применением известных методов построения точных решений этих задач;
- применением численных методов решения задач механики деформируемого твердого тела для проверки безошибочности построения

полученных аналитических решений с помощью доступных известных вычислительных программных комплексов;

– сопоставлением полученных в работе аналитических решений в частных случаях с уже известными точными решениями, полученными ранее;

– сравнением полученных в диссертационной работе результатов с известными результатами экспериментальных работ, посвященных поведению исследуемых в диссертации механических объектов;

– ожидаемым механическим поведением исследуемых объектов в легко предсказуемых частных случаях.

Апробация полученных научных результатов. Все полученные в диссертационной работе научные результаты были полностью опубликованы в рекомендованных для этого ВАК РФ рецензируемых научных изданиях, в том числе индексируемых в международных наукометрических базах данных. Также они были доложены и обсуждались с участием ведущих российских и зарубежных специалистов в области механики деформируемого твердого тела на множестве научных семинаров, Всероссийских и международных конференций.

Замечания. Относительно изложения и содержания текста диссертации и авторефера необходимо сделать следующие замечания.

1. В тексте встречаются описки и допускаются некоторые терминологические и нотационные вольности, а также неаккуратные, неполные или неточные высказывания, вводящие читателя в заблуждение или затрудняющие адекватное восприятие изложенного материала, например (ниже даются ссылки на страницы, формулы и рисунки в самой диссертационной работе, а ссылки на аналогичные места в авторефере не приводятся):

– величина нормального напряжения на поверхности, а не противоположная к ней величина, называется «давлением» (с. 85, ф. (3.15));

– механизм разрушения за счет достижения критически большого значения касательными напряжениями, действующими вдоль поверхности изотропии на площадках, перпендикулярных к этой поверхности (т.е. третьим инвариантом напряженного состояния трансверсально-изотропного тела), по всему тексту (начиная со с. 5) называется разрушением за счет сдвига «по поверхности изотропии»;

– сумма нецелых степеней радиальной координаты с некоторыми

числовыми коэффициентами называется «многочленом» (с. 25, 26);

– один из показателей анизотропии, на протяжении всего текста обозначаемый буквой k , на с. 88 обозначен буквой n , которая всюду в диссертации соответствует индексу разложения в ряд по многочленам Лежандра;

– используемый (с. 26) индекс j_n на самом деле должен восприниматься как пара независимых индексов j и n ;

– на с. 22 и 54 говорится о том, что при разложении перемещений в ряды по полиномам Лежандра получается n систем обыкновенных дифференциальных уравнений для коэффициентов разложений, на самом же деле эти уравнения (и коэффициенты) всего лишь занумерованы индексом n , и их бесконечное число;

– в параграфе 1.2 допущен сдвиг нумерации ссылок на формулы: (1.18) в начале с. 31 ссылается на самом деле на (1.19), (1.15) — на (1.16) и т.д.;

– при описании в вводной части работы применяемых далее универсальных критериев разрушения (с. 5) пропущены знаки модуля у первого и второго инвариантов тензора напряжений;

– на с. 52 i -й коэффициент v (без тильды) характеризуется как коэффициент поперечной деформации в радиальном направлении от растяжения в окружном или меридиональном направлении, однако при этом имеется в виду коэффициент поперечной деформации, связывающий направления в плоскости изотропии;

– при иллюстрации поля перемещений незакрепленной поверхности тяжелой железобетонной крепи и подкрепленной горной породы говорится о задании в качестве дополнительного деформирующего фактора избыточного давления в точках поверхности тела (с. 47), хотя затем в расчетах автором задается величина полного давления;

– в аннотации к Главе 2 (с. 50) говорится об описании совместного деформирования железобетонной крепи и окружающего ее массива осадочных пород или сыпучих геосред, хотя на самом деле имеется в виду только взаимодействие с сыпучей средой окружающей крепь осадочной породы, то есть конкретный вид граничных условий на периферии породного массива (с. 67–69), и деформирование сыпучей среды изучать не предполагается.

2. В работе всегда одновременно и симметрично оценивается опасность

разрушения конструкции от растяжения и от сжатия, однако это не оправдано для многих конструкционных и природных материалов, в частности, железобетона и горных пород, которые выбираются в качестве основных моделируемых материалов исследуемых сферических крепей и окружающих их массивов.

3. В параграфе 1.4 принимается, что некоторый условно выделенный слой горной породы, контактирующий с жесткой крепью, не подвержен действию какого-либо внешнего давления на его периферийную сферическую границу. Однако при этом вес самого этого слоя учитывается, что в силу условности выделения в породе данного слоя кажется нелогичным, поскольку в этом случае необходимо учитывать и гравитационное давление на поверхность выделенного слоя со стороны остальной части горной породы. Также в предлагаемой в данном параграфе модели остается открытым вопрос о том, из каких соображений следует выбирать величину внешнего радиуса условно выделенного слоя.

4. В работе особо подчеркивается, что в рассматриваемой тяжелой сфере радиальное положение внутренних экстремумов радиальных (с. 45) или касательных (с. 67) напряжений или нуля окружных напряжений (с. 33) получается одинаковым для разных значений меридионального угла, что избавляет нас от контроля за наступлением критических состояний во всем диапазоне значений меридиональной координаты. Однако следует также подчеркнуть, что эта математическая особенность является следствием весьма частных условий нагружения и закрепления, рассматриваемых в расчетах (при нулевом заданном давлении на сферу на одной поверхности и жестком закреплении другой, как видно из полученных и приведенных в работе аналитических выражений для соответствующих компонент тензора напряжений, эти выражения представляют собой произведение некоторой функции только радиальной координаты на синус или косинус меридионального угла). При усложнении этих условий, что, безусловно, может иметь место на практике, отмеченная характерная особенность решений потеряет силу.

5. При многокритериальной оценке прочности составного сосуда давления автором не исключается из рассмотрения частный случай изотропного поведения одной из составляющих его частей (Рис. 3.1 и 3.2), однако в этом

частном случае не учитывается возможность наступления критического состояния данной части, связанного с недопустимо высоким значением максимального касательного напряжения (пропорционального модулю разности радиального и окружного напряжений) в каких-то точках.

6. При постановке задачи о составном сосуде давления, преднапряженном за счет его сборки с натягом, первоначально делается непонятное высказывание о появлении ненулевых «технологических» напряжений от такой сборки только на поверхности контакта двух составных частей сосуда (с. 81), что, очевидно, никак не может иметь места в силу равновесия любых частей составной конструкции. При этом, однако, само построение решения этой задачи автор далее проводит корректно, и в результате находит, как раз, необходимые распределения внутренних «технологических» напряжений во всем теле, что, естественно, и отвечает существу задачи.

7. Исследование влияния натяга при сборке состоящих из двух частей сосудов давления, проведенное в работе (Рис. 3.3), является весьма ценным результатом работы. Однако оно выполнено лишь для частного случая одинаковых по своим упругим свойствам составных частей, а более общий и интересный с практической точки зрения случай составного сосуда из двух различных материалов не рассматривается.

8. Во всех рассмотренных в работе задачах инварианты тензора напряжений относительно допустимых для транстропного тела преобразований совпадают с величинами компонент тензора напряжений в сферической системе координат: первый инвариант — с величиной окружного и меридионального напряжения, второй — с величиной радиального напряжения, четвертый — с абсолютной величиной касательного напряжения (а третий тождественно равен нулю). Для читателя диссертации было бы гораздо нагляднее и удобнее с точки зрения восприятия результатов, если бы на всех графиках, иллюстрирующих выполненные расчеты, отмечались именно компоненты тензора напряжений, а не инварианты напряженного состояния, но при этом в тексте содержалось бы явное указание на соответствие между ними.

Рекомендации относительно возможных дальнейших исследований:

1. В диссертационной работе обсуждается довольно широкий круг прикладных задач, для исследования которых оказалось достаточным использования двух первых членов разложений компонент напряженно-

деформированного состояния в ряды по полиномам Лежандра. Между тем, в работе подготовлен весь математический аппарат для использования этих разложений в полном виде (с. 54–55). Дальнейший учет большего числа приближений в этих разложениях, вплоть до возможного получения решений в форме бесконечных рядов, позволит существенным образом расширить спектр возможных приложений полученных в диссертации теоретических результатов.

В частности, окажется возможным:

- рассмотреть более сложные условия закрепления и нагружения изучаемого объекта по его внешней и внутренней сферическим поверхностям;
- рассмотреть более сложные контактные условия на границе раздела отдельных составных частей изучаемого объекта сферической формы;
- в различных по постановке задачах оценить опасность разрушения изучаемых сферических транстропных объектов по механизму сдвига в плоскости изотропии, т.е. за счет достижения критических значений третьим инвариантом напряженного состояния, который тождественно равен нулю в рассмотренных в работе прикладных задачах.

2. В задачах о равновесии тяжелой сферической железобетонной крепи, сцепленной с окружающим деформируемым (первая логическая часть параграфа 2.4 — до с. 67 включительно) либо недеформируемым (параграф 1.2) породным массивом максимум в пределах крепи растягивающих радиальных напряжений наблюдается в верхнем полюсе внешней поверхности крепи, а касательных напряжений — на экваторе этой поверхности (Рис. 1.2, 2.2, 2.3), что вполне естественно при заданных условиях деформирования. Автор делает из этого вывод, что именно указанные точки являются опасными с точки зрения возникновения в стенке крепи очагов разрушения соответственно по механизму растяжения вдоль оси транстропии или сдвига вдоль поверхности изотропии (межслойного сдвига). Однако поскольку указанные максимальные напряжения являются контактными на границе соприкосновения крепи и окружающего ее природного массива, то еще одним (и даже более вероятным) сценарием при превышении этими напряжениями некоторых критических уровней будет не разрушение материала крепи, а только его отслоение (путем нормального отрыва или сдвига) от горной породы в окрестности соответствующей точки с вытекающим отсюда ввиду изменения граничных условий перераспределением напряжений во всей конструкции. Хотя этот сценарий и не

может быть учтен в рамках разработанной и применяемой в работе модели, однако эта модель имеет все возможности послужить отправной точкой (начальным приближением) для итерационного расчета описанной ситуации с отслоением: после применения данной модели необходимо перейти на следующий шаг, изменяя тип граничных условий на тех участках поверхности, где нарушено соответствующее условие адгезионной прочности, и т.д.

3. Аналогично сказанному в пункте 2 настоящих рекомендаций обстоит дело и в задаче о взаимодействии тяжелой деформируемой крепи с массивом горной породы, окруженным сыпучей средой (вторая логическая часть параграфа 2.4 — с конца с. 67). Коль скоро выставленное в этой задаче первое в (2.21) граничное условие (на перемещения) запрещает не только положительные (вдавливающие) перемещения в пределы сыпучей среды, но и отрицательные (отслаивающие) перемещения, в то время как сыпучие среды лишены способности сопротивляться растяжению, то в полученном в итоге решении будет наблюдаться наличие положительных (растягивающих, удерживающих) радиальных напряжений на периферии горной породы (Рис. 2.5), которые не могут быть обеспечены при ее контакте с сыпучей средой. Однако полученное решение следует рассматривать лишь как начальное приближение в цепочке дальнейших уточняющих итераций, выполняемых на основании более сложных моделей: на той части внешней поверхности породного массива, где предлагаемая в данной работе стартовая модель дает отрицательное давление (растягивающее нормальное напряжение), необходимо изменить тип граничных условий и перейти к следующему шагу.

4. В первой логической части параграфа 2.4 (до с. 67 включительно) рассматривается задача о взаимодействии тяжелой деформируемой крепи с окружающим ее массивом горной породы и предполагается, что на сферической периферии выделенный слой массива находится в условиях жесткого закрепления. Автор исследует, как выбор различных значений конечной толщины выделяемого слоя породы влияет на распределения напряжений в крепи. Между тем, понятно, что чем меньше эта толщина, тем меньшее прикладное значение будет иметь расчет по предложенной модели, поскольку наибольшую опасность при формировании выработок в толще горных пород несет в себе возможность обрушения массива в полость выработки, с целью предотвращения которого и организуется подкрепление

выработки искусственной стенкой (крепью), а такая ситуация, при которой допустимо считать, что на относительно небольшом расстоянии от созданной полости горный массив является жестко закрепленным, не должна грозить обрушением этого массива ввиду его достаточной собственной прочности. Поэтому с практической точки зрения было бы наиболее интересно исследовать поведение напряжений в крепи при стремлении радиуса внешней закрепленной поверхности породного слоя вокруг нее к бесконечности, которое в рамках предложенной автором модели может быть проведено аналитически.

5. При исследовании сферических сосудов давления в работе рассматривается только такой случай, когда действующее внешнее давление выше внутреннего. В этом случае предложенная в параграфе 3.2 модель хорошо подходит для описания поведения подземных и подводных резервуаров. Но практический интерес представляют и такие резервуары, давление внутри которых значительно превышает внешнее (например, атмосферное) давление. Такой случай также может и должен быть исследован в рамках предлагаемой автором модели.

Теоретическая значимость и практическая ценность результатов. Практическая ценность диссертационной работы несомненна и обусловлена большим числом важных приложений полученных ее автором результатов, небольшая часть которых подробно исследована в самой работе, а еще некоторая возможная часть описана в предыдущем разделе настоящего отзыва. Теоретическая значимость результатов работы заключается в построении в ней ряда новых аналитических решений задач механики деформируемого твердого тела и обусловлена общеизвестными и неоспоримыми ценными преимуществами подобного рода решений. С помощью таких решений могут осуществляться:

- верификация различных численных алгоритмов расчета процессов деформирования твердых тел и составных конструкций;
- идентификация характеристик определяющих соотношений материалов, в том числе оценка эффективных свойств композитов;
- постановка и решение различных задач управления состоянием и функциональными свойствами создаваемых и эксплуатируемых элементов технических конструкций и строительных сооружений, деталей машин и механизмов, а также постановка и решение разного рода обратных задач механики;

– качественная и количественная оценка границ применимости тех или иных условий и ограничений, накладываемых в различных моделях механики на поведение моделируемых объектов или систем.

Все эти аспекты достаточно ярко и убедительно продемонстрированы в диссертационной работе. Но, кроме них, и при этом особо, хотелось бы подчеркнуть еще одно возможное теоретическое применение построенных в диссертации точных аналитических решений новых задач линейной теории упругости — их применение в смежной области механики деформируемого твердого тела, изучающей процессы аддитивного роста деформируемого континуума. Заметим, что сама геометрия таких рассмотренных в работе объектов как сферически транстропная крепь или сферически транстропный сосуд подсказывают самый естественный путь их изготовления — за счет послойного наращивания дополнительно присоединяемыми материальными слоями (например, методом послойного бетонирования или послойной каменной кладки подкрепляющей стенки сферической формы, методом послойной разнонаправленной намотки погружаемых в связующее армирующих волокон на поверхность создаваемой композитной сферической оболочки). Названная область механики, за которой закрепилось название механики наращиваемых, или растущих тел, активно развивается в настоящее время в рамках созданной академиком Н.Х. Арутюняном и профессором А.В. Манжировым отечественной научной школы. Построенные в диссертационной работе А.А. Фукалова зависимости могут использоваться в качестве вспомогательных аналитических инструментов внутри разработанных в механике растущих тел эффективных методов решения возникающих в ней неклассических начально-краевых задач для наращиваемых тел с соответствующими геометрией и симметрией свойств.

Заключение. Отмеченные замечания, а также высказанные пожелания, рекомендации и комментарии ни в коей мере не снижают научной значимости и прикладной ценности полученных в диссертационной работе А.А. Фукалова результатов и сделанных на их основе выводов теоретического и практического характера, равно как и не ставят под сомнение их достоверность.

Текст автореферата и публикаций соискателя по теме представленной к защите диссертационной работы адекватно и достаточно полно отражают ее содержание.

Диссертационная работа А.А. Фукалова по содержанию и полученным результатам **соответствует шифру** паспорта специальности 1.1.8. Механика деформируемого твердого тела, **является завершенной научно-квалификационной работой**, вносящей существенный вклад в развитие соответствующей области науки и удовлетворяет требованиям, предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук, п. 9–14 «Положения о присуждении ученых степеней» утвержденного постановлением Правительства Российской Федерации № 842 от 24.09.2013 года, а ее автор — Фукалов Антон Александрович — заслуживает присвоения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.1.8. Механика деформируемого твердого тела.

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
Институт проблем механики им. А.Ю. Ишлинского Российской академии наук,
старший научный сотрудник
лаборатории моделирования в механике деформируемого твердого тела
кандидат физико-математических наук
(01.02.04 — Механика деформируемого твердого тела)

01 декабря 2022 г.



Паршин Дмитрий Александрович

119526, г. Москва, просп. Вернадского, д. 101, корп. 1,
Институт проблем механики им. А.Ю. Ишлинского РАН,
<http://ipmnet.ru>, parshin@ipmnet.ru, тел.: +7-495-434-4639

Подпись Паршина Дмитрия Александровича

ЗАВЕРЯЮ:



Ученый секретарь ИПМех РАН, к.ф.-м.н. М.А. Котов