

## СВЕДЕНИЯ О РЕЗУЛЬТАТАХ ПУБЛИЧНОЙ ЗАЩИТЫ ДИССЕРТАЦИИ

**Диссертационный совет:** 24.2.327.07

**Соискатель:** Коровайцева Екатерина Анатольевна

**Тема диссертации:** Моделирование процессов деформирования тонкостенных оболочек вращения из гиперупругих материалов

**Специальность:** 1.1.8. Механика деформируемого твердого тела

**Решение диссертационного совета по результатам защиты диссертации:**

Теоретические и практические положения разработанного в диссертации нового направления развития нелинейной теории оболочек из гиперупругих материалов можно квалифицировать как решение крупной научной проблемы в области механики тонкостенных конструкций. Диссертация соответствует требованиям пунктов 9-14 «Положения о присуждении ученых степеней», утвержденного постановлением Правительства РФ от 24 сентября 2013 года № 842.

На заседании 17 апреля 2024 года диссертационный совет принял решение присудить Коровайцевой Екатерине Анатольевне ученую степень доктора физико-математических наук.

**Присутствовали:** Председатель диссертационного совета Тарлаковский Д.В., заместители председателя диссертационного совета Земсков А.В. и Фирсанов В.В., ученый секретарь диссертационного совета Сердюк Д.О.

**Члены диссертационного совета:** Булычев Н.А., Вестяк В.А., Дмитриев В.Г., Медведский А.Л., Меркурьев И.В., Миронова Л.И., Рабинский Л.Н., Солдатенков И.А., Федотенков Г.В.

Председатель  
диссертационного совета 24.2.327.07,  
д.ф.-м.н., профессор

Тарлаковский Д.В.

Ученый секретарь  
диссертационного совета 24.2.327.07,  
к.т.н., доцент

Сердюк Д.О.

Начальник  
Т.А. Аник



ЗАКЛЮЧЕНИЕ ДИССЕРТАЦИОННОГО СОВЕТА 24.2.327.07,  
СОЗДАННОГО НА БАЗЕ ФЕДЕРАЛЬНОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО  
БЮДЖЕТНОГО ОБРАЗОВАТЕЛЬНОГО УЧРЕЖДЕНИЯ ВЫСШЕГО  
ОБРАЗОВАНИЯ «МОСКОВСКИЙ АВИАЦИОННЫЙ ИНСТИТУТ  
(НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ)»  
МИНИСТЕРСТВА НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ  
ФЕДЕРАЦИИ ПО ДИССЕРТАЦИИ НА СОИСКАНИЕ УЧЕНОЙ СТЕПЕНИ  
ДОКТОРА НАУК

аттестационное дело № \_\_\_\_\_

решение диссертационного совета от «17» апреля 2024 г. № 33

О присуждении Коровайцевой Екатерине Анатольевне, гражданке Российской Федерации, ученой степени доктора физико-математических наук.

Диссертация «Моделирование процессов деформирования тонкостенных оболочек вращения из гиперупругих материалов» по специальности 1.1.8. – «Механика деформируемого твердого тела», принята к защите «11» января 2024 г., протокол № 32, диссертационным советом 24.2.327.07, созданным на базе федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)» Министерства науки и высшего образования РФ, 125993, г. Москва, Волоколамское шоссе, д. 4, приказ о создании диссертационного совета 24.2.327.07 – № 1184/нк от «12» октября 2022 г.

Соискатель Коровайцева Екатерина Анатольевна, 26 июня 1986 года рождения, в 2009 г. окончила федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана» по специальности «Прикладная механика». В 2012 году Коровайцева Екатерина

Анатольевна защитила диссертацию на соискание ученой степени кандидата технических наук «Разработка методов моделирования динамики высокоточных кварцевых генераторов и их основных элементов» по специальности 01.02.06 «Динамика, прочность машин, приборов и аппаратуры» в диссертационном совете Д.212.125.05, созданном на базе федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)».

Работает старшим научным сотрудником лаборатории динамических испытаний научно-исследовательского института механики федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова».

Диссертация выполнена в лаборатории динамических испытаний научно-исследовательского института механики федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова».

Официальные оппоненты:

**Сорокин Федор Дмитриевич**, доктор технических наук, доцент, профессор кафедры «Прикладная механика» федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана», г. Москва,

**Бережной Дмитрий Валерьевич**, доктор физико-математических наук, доцент, профессор кафедры «Теоретическая механика» федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Казанский (Приволжский) федеральный университет», г. Казань,

**Шутов Алексей Валерьевич**, доктор физико-математических наук, главный научный сотрудник лаборатории механики композитов федерального государственного бюджетного учреждения науки «Институт гидродинамики им. М.А. Лаврентьева СО РАН», г. Новосибирск,

**дали положительные отзывы на диссертацию.**

Ведущая организация: федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «**Казанский государственный энергетический университет**», г. **Казань**, в своем положительном отзыве, подписанном кандидатом физико-математических наук, доцентом, заведующим кафедрой «Цифровые системы и модели» федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Казанский государственный энергетический университет» **Смирновым Ю.Н.** и доктором технических наук, профессором, профессором кафедры «Цифровые системы и модели» федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Казанский государственный энергетический университет» **Гимадиевым Р.Ш.** и утверждённом доктором технических наук, профессором, проректором по науке и коммерциализации федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Казанский государственный энергетический университет» **Ившиным И.В.** указала, что диссертация Коровайцевой Екатерины Анатольевны представляет собой самостоятельную, завершённую научно-квалификационную работу, в которой решена актуальная проблема расчета тонкостенных оболочечных конструкций из гиперупругих материалов для случая произвольной физической и геометрической нелинейности, имеющая важное значение для ряда современных приборостроительных отраслей промышленности. Диссертация соответствует всем требованиям п.п. 9-14 «Положения о присуждении ученых степеней», утвержденного Постановлением Правительства РФ от 24.09.2013 г. №842, а её автор, Коровайцева Екатерина Анатольевна, заслуживает присуждения ей искомой ученой степени доктора

физико-математических наук по специальности 1.1.8. – «Механика деформируемого твердого тела».

Соискатель имеет 29 опубликованных работ по теме диссертации, в том числе 7 статей в журналах, входящих в перечень рецензируемых научных изданий ВАК РФ, и 5 статей в журналах, входящих в мировые базы научного цитирования SCOPUS и Web of Science, а также 3 Свидетельства о государственной регистрации программы для ЭВМ.

Наиболее значимые работы по теме диссертации:

1. Коровайцева Е.А. Смешанные уравнения теории мягких оболочек // Труды МАИ. – 2019. – №108. – URL: <http://trudymai.ru/published.php?ID=109235>

2. Коровайцева Е.А. О некоторых особенностях решения задач статики мягких оболочек вращения при больших деформациях // Труды МАИ. – 2020. – № 114. – URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=118881>

3. Коровайцева Е.А. Систематизация одномерных краевых задач механики деформируемого твердого тела // Труды МАИ. – 2020. – № 110. – URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=112827>

4. Коровайцева Е. А. Исследование особенностей решения задач нестационарной динамики мягких оболочек из высокоэластичных материалов // Проблемы прочности и пластичности. — 2021. — Т. 83, № 2. — С. 151–159.

5. Коровайцева Е.А. Об использовании метода автоматической сегментации в решении нелинейных начально-краевых задач механики мягкооболочечных конструкций // Проблемы прочности и пластичности. — 2021. — Т.83, №4. — С. 5-13.

6. Коровайцева Е. А. Применение метода дифференцирования по параметру в решении нелинейных задач стационарной динамики осесимметричных мягких оболочек // Вестник Самарского государственного технического университета. Серия Физико-математические науки. — 2021. — Т. 25, № 3. — С. 556–570.

7. Коровайцева Е.А. К обоснованию однозначности продолжения решения задач о деформировании мягких оболочек методом дифференцирования по параметру // Проблемы прочности и пластичности. — 2022. — том 84, № 3. — С. 343-350.

8. Коровайцева Е.А. Сравнительный анализ статического деформирования мягких оболочек канонических форм меридиана при раздувании // Труды МАИ. — 2022. — № 123. — URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=165315>

9. Коровайцева Е.А. Об исследовании влияния параметров исходных данных на деформирование мягких оболочек вращения // Проблемы прочности и пластичности. — 2023. — том 85, № 2. — С. 5-13.

10. Коровайцева Е.А. Исследование влияния локального утонения на закритическое поведение цилиндрической оболочки из гиперупругого материала // Труды МАИ. — 2023. — Т. 131. — URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=175912>.

В этих и остальных работах приведены математические постановки, сформулированы алгоритмы решения и приведены результаты решения новых задач статического и динамического деформирования тонкостенных оболочек вращения из гиперупругих материалов.

На диссертацию и автореферат поступили отзывы:

от ведущей организации и официальных оппонентов, отзывы положительные;

от доктора физико-математических наук, профессора кафедры «Робототехника, мехатроника, динамика и прочность машин» ФГБОУ ВО НИУ «МЭИ» Дуйшеналиева Туратбека Болотбековича, отзыв положительный;

от доктора физико-математических наук, доцента, заведующего кафедрой «Информационная безопасность автоматизированных систем» ФГБОУ ВО «Саратовский государственный технический университет имени Гагарина Ю.А.» Кондратова Дмитрия Вячеславовича, отзыв положительный;

от доктора физико-математических наук, профессора, профессора кафедры «Прочность конструкций» Казанского национального исследовательского технического университета им. А.Н. Туполева – КАИ Паймушина Виталия Николаевича, отзыв положительный;

от доктора технических наук, профессора, главного научного сотрудника НИИ механики ННГУ им. Н.И. Лобачевского Брагова Анатолия Михайловича, отзыв положительный;

от доктора физико-математических наук, профессора, профессора кафедры «Строительная механика, геотехника и строительные конструкции» Белорусского государственного университета транспорта Старовойтова Эдуарда Ивановича и доктора физико-математических наук, профессора, заведующего кафедрой «Строительная механика, геотехника и строительные конструкции» Белорусского государственного университета транспорта Леоненко Дениса Владимировича, отзыв положительный;

от доктора технических наук, профессора, профессора кафедры «Математические методы в строительстве» Белорусского национального технического университета Босакова Сергея Викторовича и кандидата технических наук, доцента, доцента кафедры «Математические методы в строительстве» Белорусского национального технического университета, заведующей кафедрой «Строительство и эксплуатация зданий и сооружений» ФСН МИПКиПК Белорусского национального технического университета Козуновой Оксаны Васильевны, отзыв положительный;

от член-корреспондента НАН Армении, доктора физико-математических наук, профессора, заслуженного деятеля науки Армении, заведующего лабораторией «Механика материалов и конструкций нано- и микротехники» Ширакского государственного университета им. М. Налбандяна, Саркисяна Самвела Оганесовича, отзыв положительный;

от доктора физико-математических наук, доцента, профессора кафедры «Теоретической, компьютерной и экспериментальной механики» Национального исследовательского Нижегородского государственного

университета им. Н.И. Лобачевского Чекмарева Дмитрия Тимофеевича, отзыв положительный.

В поступивших отзывах отмечена актуальность темы диссертационного исследования, дан краткий обзор работы по главам, отмечены актуальность, новизна и достоверность полученных автором результатов, а также их практическая значимость.

В поступивших отзывах имеются замечания.

В отзыве ведущей организации федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Казанский государственный энергетический университет» имеются следующие замечания:

1. Было бы интересно экспериментально исследовать поведение сферической оболочки из гиперупругого материала, раздуваемой линейно возрастающим во времени давлением, и сравнить экспериментально и численно полученные результаты.

2. Разработанные алгоритмы решения задач деформирования оболочек вращения из гиперупругих материалов предполагают возможность их применения к исследованию поведения составных оболочек, однако в работе рассмотрены лишь оболочки однородной формы меридиана.

3. Имеется ряд редакционных замечаний.

Замечания в отзыве официального оппонента Сорокина Ф.Д.:

1. В диссертации несколько раз упоминались численные проблемы, возникающие в полюсе замкнутой оболочки, и это объяснялось тем, что «матрица Якоби разрешающей системы уравнений имеет сингулярные элементы» (цитата). В классической теории оболочек в таких случаях используют разгонный участок. Осталось непонятным, почему разгонный участок не был использован для преодоления указанной проблемы.

2. Нелинейные уравнения моментной теории оболочек (вариант В.Н. Паймушина на стр. 162-163) представлены в диссертации излишне коротко, что требует от читателя обращения к литературным источникам для



выяснения способа получения данных уравнений, их особенностей, гипотез и предположений, использованных при их выводе, ограничений и т.п.

3. Для задач динамики, в которых нет аналитического решения, критерием правильности численного решения принята стабилизация решения при уменьшении шага по времени. Но почему бы не использовать в качестве критерия закон сохранения полной механической энергии, которая вычисляется сравнительно просто? При этом постоянное давление обладает потенциалом ( $-p\Delta V$ ).

4. Понятие «деформация» для объекта, в котором размеры меняются в десятки раз, теряет свою привлекательность. Например, поперечная деформация, равная минус 99%, воспринимается очень непривычно (толщина уменьшилась в 100 раз). Уравнения могли бы выглядеть более наглядными в терминах кратностей удлинений  $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3$  без перехода к деформациям.

Замечания в отзыве официального оппонента Бережного Д.В.:

1) В работе большое внимание уделяется вопросам численной реализации механико-математической задачи, а вот обоснование выбора используемых уравнений механики, особенно для случая конечных деформаций и больших перемещений, могло бы быть более подробным и детальным.

2) В работе для описания поведения оболочки из высокоэластичного материала «при скачкообразном изменении геометрических параметров оболочки или иных граничных условиях» из всего многообразия соотношений моментной теории оболочек выбраны уравнения в форме В.Н. Паймушина. Этот выбор требует более подробного обоснования, т.к. подход В.Н. Паймушина к описанию нелинейного деформирования несколько отличается от традиционного.

3) В работе нет сравнения полученных результатов с численными результатами других авторов или результатами, полученными при использовании современных коммерческих конечно-элементных

программных комплексов. Сравнения с экспериментом тоже нет, но это объясняется трудностью реализации условий эксперимента при выборе расчетной схемы.

4) В работе отмечается, что «введение локального малого изменения толщины цилиндрической оболочки из высокоэластичного материала приводит к существенному изменению ее закритического поведения, а при решении краевой задачи о статическом деформировании такой оболочки позволяет определить тип потери устойчивости – образование «пузыря» или образование шейки», но плохо иллюстрируется, нет наглядности. А что будет не в случае локального утонения, в случае локального утолщения? Либо локальное изменение толщины расположено в зоне закрепления?

5) Было бы интересно исследовать особенности деформирования оболочек из гиперупругих материалов при неоднородном распределении давления по меридиану (например, градиентальном).

6) Представляется, что при нагружении оболочки гармонически изменяющимся во времени давлением более корректно было бы на начальном этапе нагружения задавать давление, линейно возрастающее от нуля до некоторой величины.

7) По тексту диссертации отмечается непостоянство используемой автором терминологии. Речь идет то о мягких оболочках, то об оболочках из гиперупругих материалов. Представляется корректным использовать постоянно один определенный термин, а именно – оболочка из гиперупругого материала, что обуславливается выбором физических соотношений в задаче.

Замечания в отзыве официального оппонента Шутова А.В.:

1. Из работы не ясно, можно ли обобщить представленные методики расчётов на случай сжимаемого гиперупругого материала? Возможен ли случай ортотропного гиперупругого материала, если оси ортотропии согласованы с осевой симметрией задачи?

2. Векторно-матричные формы уравнений вводятся без необходимых пояснений. Так, например, для уравнений (3.1) и (3.2) форма

операторов  $A, B, b$  не конкретизируется. Для уравнений (3.23) – (3.26) не описаны операторы  $A, C, a, D, E, d, B_1, G_1, b_1, H_1, K_1, h_1$ . Это обстоятельство затрудняет работу с уравнениями. В случае, если другая научная группа пожелает воспроизвести полученные результаты, отсутствие описания операторов может стать некоторым препятствием.

3. В обзоре литературы по теме диссертации отсутствует обсуждение работ других отечественных групп, также моделирующих деформирование оболочечных конструкций с помощью метода продолжения по параметру. Например, не обсуждена работа А.А. Семёнова и С.С. Леонова (2019) [doi: 10.26907/2541-7746.2019.2.230-249].

4. В обзоре современного состояния обойдён стороной современный эффективный подход, основанный на анализе слабой формы уравнения движения с внесением статических и кинематических оболочечных гипотез непосредственно в трёхмерную формулировку. Указанный способ показал свою практическую ценность и подробно описан в классических монографиях по МКЭ:

T.J.R. Hughes. The Finite Element Method 1987

O.Z. Zienkiewicz, R.L. Taylor. The Finite Element Method, 1991

K.J. Bathe. Finite Element Procedures 1996

5. При решении динамических задач о деформировании гиперупругих конструкций в потенциальном поле сил существует дополнительная возможность проверки точности вычислений. А именно, интеграл полной энергии должен оставаться постоянным на решении. Проводился ли подобный контроль точности решений?

6. На странице 135 отмечается, что «коническая оболочка деформируется лишь в малом диапазоне перемещений и деформаций». С чем это связано? Этот эффект имеет механическое объяснение или речь идёт о вычислительном артефакте?

7. На странице 64 главные напряжения вычисляются как производные от потенциала по собственным числам правого тензора Коши-Грина (шестая

строка сверху). При этом указывается, что величина  $p$  задаёт гидростатическое давление. Вопреки публикациям ряда авторов,  $p$  - не гидростатическая компонента тензора напряжений, а некоторый произвольный скаляр. Произвольность  $p$  соответствует неопределённости гидростатической компоненты напряжений в несжимаемых материалах.

8. Какова причина значительных осцилляций кривых 1 и 2 на рисунке 4.71? Чем вызвана осцилляция максимальных меридиональных деформаций?

9. При решении задач гидроформовки естественно выбрать в качестве параметра продолжения внутренний объём. Однако подобный практически важный случай в диссертации не рассматривается.

10. В некоторых частях диссертации, термин «деформация» используется слишком вольно, без конкретизации типа деформации. Например, в диссертации говорится об «окружных деформациях порядка 2000%». Указанный уровень деформирования может отличаться на порядки в зависимости от принятой меры деформации: 2000% логарифмической деформации соответствует 48 516 519 441% инженерной деформации, то есть растяжению в 485 165 194 раз.

11. На странице 95 автор ссылается на формулу (2.60) как на соотношения нео-Гука. В действительности, формула (2.60) соответствует более общему двухпараметрическому потенциалу Муни-Ривлина.

12. В разных частях диссертации соискатель упоминает «первую норму» матрицы. О какой именно норме идёт речь? О норме  $l_1$ ?

13. На странице 110, соискатель вводит меру погрешности  $\Delta$  как норму произведения матриц  $\mathbf{M}^T \mathbf{N}$ . Так как в точном решении  $\mathbf{M}^T \mathbf{N}$  должно равняться единичной матрице  $\mathbf{E}$ , более обоснована была бы норма матрицы  $\mathbf{M}^T \mathbf{N} - \mathbf{E}$ .

В отзывах на автореферат следует отметить такие критические замечания.

1. В главе 4 предложен метод автоматической сегментации интервала интегрирования краевой задачи, однако не проведено его сравнение

с известным методом сегментации, основанным на использовании более простых критериев (в отзыве от Дуйшеналиева Т.Б.);

2. Научную новизну работы не может составлять «Получение разрешающих соотношений ...», «Разработка систематизации ...» и т.д., так как получение, разработка – это процесс, а не конечный результат. Здесь уместнее указать на новые разрешающие уравнения, систематизацию краевых задач и т.д., проведенных автором (в отзыве от Старовойтова Э.И., Леоненко Д.В.);

3. При описании рис. 7. нет пояснения, почему уменьшается амплитуда колебаний во времени при равномерно распределенном давлении (в отзыве от Старовойтова Э.И., Леоненко Д.В.);

4. Судя по автореферату модельные задачи решались для коротких оболочек ( $L \approx 2R$ ). Было бы интересно знать, насколько устойчивы предлагаемые алгоритмы для длинных оболочек ( $L \approx 10R$ ) (в отзыве от Старовойтова Э.И., Леоненко Д.В.);

5. На наш взгляд, для вывода уравнений движения мягкой оболочки (уравнения на с.9 автореферата, п. 2.6 диссертации) более корректно использовать вариационный принцип Гамильтона или же использовать вариационный принцип Лагранжа (был использован при статической постановке) с учетом вариации работы сил инерции. Использованный же в работе принцип д'Аламбера к готовым уравнениям статического равновесия не позволяет учесть все инерционные слагаемые в уравнениях движения. (в отзыве от Старовойтова Э.И., Леоненко Д.В.);

6. Автор описывает явление динамического хлопка для замкнутой сферической оболочки из гиперупругого материала Йео, однако представляется интересным изучить возможность возникновения данного явления при раздувании полусферы с неподвижно закрепленным экватором, а также при раздувании оболочек вращения иных форм меридиана (в отзыве от Брагова А.М.);

7. Насколько корректно использование технической теории Кирхгофа-Лява для расчета дважды нелинейной рассматриваемой задачи? (в отзыве от Босакова С.В., Козуновой О.В.);

8. В каких системах координат выполнялись расчеты полусферы, цилиндра и тора (рисунок 2)? (в отзыве от Босакова С.В., Козуновой О.В.);

9. Какую размерность имеет вертикальная ось “ $p$ ” на рисунках 2, 4, 5, 10? (в отзыве от Босакова С.В., Козуновой О.В.);

10. Судя по рисункам 8, 14 автореферата, автор не учитывает силы сопротивления при динамических нагружениях. Так ли это? (в отзыве от Босакова С.В., Козуновой О.В.);

11. Было ли проведено сопоставление полученных результатов с результатами других авторов? (в отзыве от Босакова С.В., Козуновой О.В.);

12. В тексте автореферата приводятся ссылки на различные приемы, позволяющие построить качественные численные решения поставленных задач. По-видимому, необходимость в этих приемах связана с некорректностью математических постановок задач, в частности, проблемами с единственностью решений. Однако в автореферате отсутствует упоминание о проблеме корректности задач теории мягких оболочек (в отзыве от Чекмарева Д.Т.);

13. Во второй главе диссертации получены уравнения неосесимметричного статического деформирования мягких оболочек вращения при произвольных перемещениях и деформациях, однако в работе развиты алгоритмы решения лишь частной осесимметричной задачи указанного класса (в отзыве от Саркисяна С.О.).

**Выбор официальных оппонентов и ведущей организации обосновывается** тем, что официальные оппоненты являются высококвалифицированными специалистами по заявленной научной специальности, способными оценить научную и практическую значимость диссертации, а в ведущей организации проводятся исследования в области деформирования тонкостенных элементов конструкций при больших

перемещениях и деформациях. Официальные оппоненты и сотрудники ведущей организации имеют значительное количество публикаций, связанных с направлением исследований диссертации.

Диссертационный совет отмечает, что на основании выполненных соискателем исследований:

**разработаны** математические модели и алгоритмы решения задач об осесимметричном статическом и динамическом деформировании тонкостенных оболочек вращения из гиперупругих материалов при произвольных перемещениях и деформациях;

**предложены** новые подходы к контролю точности численного решения краевой задачи, реализуемые в процессе построения решения: метод автоматической сегментации интервала интегрирования и критерий однозначности решения нелинейных краевых задач;

**доказана** перспективность использования методов и алгоритмов, разработанных в диссертации, применительно к решению широкого круга новых задач нелинейного деформирования тонкостенных конструкций при произвольных перемещениях и деформациях.

**Введены новые понятия** систематизации канонических форм краевых задач, а также автоматической сегментации интервала интегрирования краевой задачи.

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

**доказаны** правомерность и обоснованность разработанных алгоритмов решения задач физически и геометрически нелинейного деформирования для оболочек из гиперупругих материалов;

применительно к проблематике диссертации результативно (эффективно, то есть с получением обладающих новизной результатов) **использован** комплекс методов решения задач механики деформируемого твердого тела, в том числе вариационные принципы, метод непрерывного продолжения решения по параметру, метод прямых, метод сегментации;

**изложена** систематизация постановок одномерных краевых задач механики деформирования тонкостенных конструкций;

**раскрыто** существенное влияние параметров вычислительного алгоритма на результаты решения задач нелинейного деформирования оболочек из гиперупругих материалов при произвольных перемещениях и деформациях;

**изучены** особенности закритического поведения оболочек из гиперупругих материалов, связанные с формой упругого потенциала материала;

**проведена модернизация** методов и алгоритмов решения задач нелинейного деформирования тонкостенных оболочек вращения, основанных на методике дифференцирования по параметру.

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

**разработаны** методы решения широкого класса задач физически и геометрически нелинейного деформирования оболочек вращения из гиперупругих материалов при произвольных перемещениях и деформациях;

**определены** перспективы практического использования разработанных методов и алгоритмов применительно к решению задач нелинейного деформирования оболочечных конструкций;

**созданы** новые эффективные алгоритмы решения задач осесимметричного статического и динамического деформирования оболочек вращения из гиперупругих материалов, допускающие единовременный контроль точности решения и анализ свойств решаемой системы уравнений;

**представлены** предложения по дальнейшему совершенствованию численных методов решения задач о нелинейном деформировании оболочечных конструкций при произвольных перемещениях и деформациях.

**Оценка достоверности результатов исследования выявила:**



**теория** построена на известных вариационных принципах и приближенных методах расчета, реализованные алгоритмы исследованы на сходимость;

**идея базируется** на использовании метода продолжения решения нелинейных задач по параметру применительно к исследованию процессов статического и динамического деформирования оболочек вращения из гиперупругих материалов при произвольных перемещениях и деформациях;

**использованы** сравнения полученных результатов с аналитическими расчетами, с результатами других авторов, а также сравнения результатов, полученных с использованием разных систем уравнений;

**установлено** качественное и количественное совпадение авторских результатов с результатами, представленными в частных случаях другими авторами или полученными аналитически;

**использованы** современные методы математического моделирования, информационные и компьютерные методы визуализации полученных результатов.

**Личный вклад соискателя состоит** в построении систем уравнений деформирования мягких оболочек из гиперупругих материалов при произвольных перемещениях и деформациях, а также уравнений технической теории мягких оболочек; в разработке систематизации постановок одномерных линейных и нелинейных краевых задач деформирования тонкостенных конструкций; в построении алгоритмов решения задач осесимметричного статического и динамического деформирования оболочек вращения из гиперупругих материалов при произвольных перемещениях и деформациях, в реализации алгоритмов решения на ЭВМ, отладке их работы. Предложены способы контроля точности решения рассматриваемых задач, реализуемые непосредственно в процессе построения решения. Исследованы особенности механического поведения оболочек вращения из гиперупругих материалов в зависимости от формы меридиана и формы упругого потенциала

материала. Определены перспективы дальнейшего развития предложенных методов и подходов.

**В ходе защиты диссертации критических замечаний высказано не было.**

Диссертация соответствует требованиям п.п. 9-14 «Положения о порядке присуждения ученых степеней», утвержденного постановлением Правительства Российской Федерации от 24 сентября 2013 г. № 842.

На заседании «17» апреля 2024 года диссертационный совет принял решение: за разработку нового направления развития нелинейной теории оболочек из гиперупругих материалов, теоретические и практические положения которого можно квалифицировать как решение крупной научной проблемы в области механики тонкостенных конструкций, присудить Коровайцевой Екатерине Анатольевне ученую степень доктора физико-математических наук.

При проведении тайного голосования диссертационный совет в количестве 13 человек, из них 7 докторов физико-математических наук по специальности 1.1.8. – «Механика деформируемого твердого тела», участвовавших в заседании, из 14 человек, входящих в состав совета, дополнительно введены на разовую защиту 0 человек, проголосовали: за 13, против 0, недействительных бюллетеней 0.

Председатель

диссертационного совета 24.2.327.07

д.ф.-м.н., профессор

Тарлаковский Д.В.

Ученый секретарь

диссертационного совета 24.2.327.07

к.т.н., доцент

Сердюк Д.О.

Начальник  
Т.А. Ани...



«17» 04 2024 года