

О Т З Ы В

официального оппонента на диссертационную работу
Коровайцевой Екатерины Анатольевны на тему: «Моделирование процессов деформирования тонкостенных оболочек вращения из гиперупругих материалов», представленную на соискание ученой степени доктора физико-математических наук по специальности

1.1.8 – Механика деформируемого твердого тела

Диссертационная работа Е.А. Коровайцевой посвящена разработке математических моделей и алгоритмов исследования осесимметричного статического и динамического поведения тонкостенных оболочек вращения из гиперупругих материалов при произвольных перемещениях и деформациях. Указанные модели описывают поведение таких устройств новых активно развивающихся отраслей приборостроения, как изделия мягкой робототехники и гибкой электроники, чем и обуславливается *актуальность* рецензируемой диссертации.

Основой для решения сформулированных в диссертации задач являются, очевидно, теоретические и прикладные исследования в области теории мягких оболочек, последовательно развиваемые в моделирование поведения описываемых конструкций с позиций моментной теории оболочек. Поэтому в большей части диссертации используется термин «мягкие оболочки», история развития и применяемое в работе толкование которого представлены во введении.

Рецензируемая диссертационная работа состоит из введения, пяти глав, заключения и списка литературы. Общий объем диссертации, включая рисунки и таблицы, составляет 290 страниц. Список литературы содержит 219 наименований.

Во введении обосновывается актуальность рассматриваемых в диссертации проблем. Отмечается разногласие терминологии работ, посвященных тематике диссертации и использующих понятие мягкой

оболочки. По итогам обзора использования указанного понятия различными авторами дано определение мягкой оболочки, используемое далее соискателем. Сформулирована постановка цели проводимого в диссертации исследования – разработка и развитие математических моделей и методов решения задач деформирования тонкостенных оболочек вращения из гиперупругих материалов при произвольных перемещениях и деформациях. Описаны научная новизна, практическая ценность работы и методы исследования, обоснована достоверность полученных результатов, приведено содержание работы по главам.

В первой главе приведен обзор различных вариантов нелинейной теории оболочек. Большой интерес представляет выполненное соискателем сравнение теоретических разработок отечественных и зарубежных авторов. Отдельно охарактеризованы работы, посвященные постановке задач деформирования мягких оболочек. В результате анализа существующих методов решения задач статического и динамического поведения мягких оболочек формулируется вывод о том, что обилие математических постановок и методов решения задач рассматриваемого в диссертации класса обуславливается многочисленностью упрощений и рассмотрений частных случаев деформирования оболочек. Как следствие, ряд вопросов остается недостаточно глубоко изученным – глубокое закритическое поведение оболочек при больших деформациях, особенности динамического поведения оболочек из гиперупругих материалов, возможности использования моментной теории для описания поведения оболочек из гиперупругих материалов и т.п.

Во второй главе диссертации представлен вывод смешанных уравнений, описывающих поведение мягких оболочек из гиперупругих материалов при больших деформациях. Используемый в работе вариант уравнений осесимметричного деформирования оболочек вращения из гиперупругих материалов сформулирован как в размерной, так и в безразмерной форме. Для случая малых деформаций построены

разрешающие соотношения технической теории мягких оболочек, применяемые на начальном этапе решения рассматриваемых в работе задач. Уравнения динамики представлены лишь для случая осесимметричного нагружения мягких оболочек вращения. Замыкающие сформированные системы уравнений физические соотношения представлены для трех видов упругого потенциала материалов – неогуковского, Муни-Ривлина и Йео.

В третьей главе представлена систематизация постановок краевых задач осесимметричного статического деформирования тонкостенных конструкций, включающая как линейные, так и нелинейные задачи. При этом рассматриваются двухточечные, многоточечные неразветвленные и многоточечные разветвленные краевые задачи, что с позиций механики соответствует однородной, составной неразветвленной и составной разветвленной конструкциям и поясняется механическим смыслом условий сопряжения сегментов. Предложенная систематизация основана на использовании векторно-матричной формализации записи систем уравнений и позволяет свести всё многообразие постановок одномерных краевых задач механики тонкостенных конструкций к шести каноническим формам. Показано, что для постановки задачи осесимметричного деформирования мягкой оболочки вращения из гиперупругого материала достаточно использовать лишь две канонические формы одномерных краевых задач предложенной систематизации.

Четвертая глава диссертационной работы посвящена разработке и применению алгоритма решения задач осесимметричного статического деформирования тонкостенных оболочек вращения из гиперупругих материалов. Алгоритм сформулирован применительно к одной из введенных в третьей главе работы канонических форм одномерных нелинейных краевых задач основан на использовании метода дифференцирования по параметру и его адаптации к особенностям рассматриваемого в работе класса задач. Отмечена необходимость регуляризации системы разрешающих уравнений деформирования оболочек из гиперупругих материалов на начальном этапе

решения задачи, предложен метод автоматической сегментации интервала интегрирования краевой задачи, позволяющий повысить точность решения, а также критерий оценки однозначности решения нелинейной краевой задачи. Описаны особенности использования предложенного алгоритма, а также решены задачи о раздувании оболочек из неогуковского материала различных форм меридиана и исследованы особенности и различия их закритического поведения. Предложен подход к теоретическому описанию закритического поведения цилиндра из различных гиперупругих материалов, нагружаемого давлением и растягивающей силой. Выполнено сравнение результатов решения задачи о раздувании цилиндрической оболочки кусочно-постоянной толщины из неогуковского материала на основании соотношений безмоментной и моментной теории оболочек. С использованием методики дифференцирования по параметру решены задачи параметрического исследования зависимости компонент напряженно-деформированного состояния оболочек из гиперупругих материалов от таких параметров исходных данных, как механические характеристики материала или геометрический размер оболочки.

В пятой главе диссертационной работы изложен алгоритм решения осесимметричных задач динамического деформирования тонкостенных оболочек вращения из гиперупругих материалов и приведены результаты его применения к ряду задач раздувания оболочек рассматриваемого класса давлением, различным образом зависящим от времени. Для повышения точности решения предлагается использование метода автоматической сегментации интервала интегрирования краевой задачи, формулируемой на одном из этапов алгоритма. Решены задачи о раздувании сферической и цилиндрической оболочек из гиперупругих материалов различных типов внезапно приложенным давлением, на примере которых исследованы особенности реализации предлагаемого алгоритма. Решение задачи о раздувании сферической оболочки линейно возрастающим давлением позволило теоретически установить явление динамического хлопка для

случая изготовления оболочки из материала Йео. Решена задача о раздувании цилиндрической оболочки из неогоуковского материала гармонически изменяющимся давлением с использованием авторской системы уравнений и системы уравнений, построенной на основании моментной теории оболочек.

В результате проведенных в диссертационной работе Коровайцевой Е.А. исследований получены следующие результаты, имеющие признаки *научной новизны*:

1) Построена система уравнений, описывающих как неосесимметричное, так и осесимметричное деформирование тонкостенных оболочек из гиперупругих материалов произвольной формы упругого потенциала, произвольной формы меридиана, при произвольных перемещениях и деформациях в предположении безмоментного напряженно-деформированного состояния;

2) Предложена систематизация одномерных краевых задач механики, позволяющая привести обилие возможных постановок задач, связанное с различиями геометрии, свойств материала или условий нагружения конструкции, к шести базовым постановкам, отличающимся числом сегментов, смыслом условий их сопряжения и наличием нелинейных соотношений;

3) Ряд результатов исследований динамического деформирования оболочек из гиперупругих материалов приоритетен не только в отечественной, но и в зарубежной науке;

4) В работе реализован комплексный подход к решению научной проблемы, заключающийся в сочетании моделирования деформирования оболочек вращения из гиперупругих материалов и анализе особенностей их механического поведения при произвольных деформациях, с одной стороны, и исследовании вычислительных особенностей решения рассматриваемых задач и разработке способов обеспечения корректности результатов, с другой стороны.

Достоверность результатов диссертационной работы подтверждается проверкой разработанных математических моделей и алгоритмов на примерах задач, имеющих аналитическое решение, анализом сходимости результатов, а также сопоставлением расчетов, полученных с использованием различных систем уравнений.

С *практической* точки зрения ценность работы заключается в обеспечении возможности использования авторского программного комплекса для исследования задач деформирования оболочек из гиперупругих материалов, который может иметь преимущество перед коммерческими конечно-элементными комплексами при анализе больших перемещений и деформаций вследствие отсутствия проблемы сильного искажения конечно-элементной сетки.

По теме диссертационного исследования соискателем опубликовано 29 работ, из них 12 в журналах, рекомендованных ВАК РФ, в числе которых 5 в изданиях, входящих в базы данных WoS и SCOPUS. Также соискателем получено 3 свидетельства о государственной регистрации программы для ЭВМ.

По диссертационной работе имеются следующие *замечания и рекомендации*:

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». 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.

Указанные замечания носят преимущественно рекомендательный характер, не относятся к новизне, достоверности и практической значимости полученных автором результатов и не влияют на общую высокую оценку диссертационного исследования.

Автореферат диссертации достаточно полно отражает содержание диссертации, её научные выводы и результаты.

Оценивая в целом диссертационную работу Е.А. Коровайцевой, можно заключить, что она является законченным научным исследованием, содержащим решение важной научной проблемы в такой области механики деформируемого тела, как исследование нелинейного деформирования тонкостенных оболочек вращения из гиперупругого материала при произвольных перемещениях и деформациях.

Считаю, что диссертация Коровайцевой Екатерины Анатольевны «Моделирование процессов деформирования тонкостенных оболочек вращения из гиперупругих материалов» удовлетворяет требованиям Положения ВАК РФ «О порядке присуждения ученых степеней», а ее автор, Коровайцева Екатерина Анатольевна, заслуживает присуждения ей искомой ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 1.1.8 – Механика деформируемого твердого тела.

Официальный оппонент -

доктор физико-математических наук,

доцент, профессор кафедры «Теоретическая

механика» ФГАОУ ВО

«Казанский (Приволжский)

федеральный университет»

25.03.2024 г.

Почтовый адрес: 420008, г. Казань, Кремлевская, 18

Телефон: +7(917) 297-97-96

Электронная почта: berezhnoi.dmitri@mail.ru



Бережной Дмитрий Валерьевич



С отзывом ознакомлена

29.03.2024.

