

ОТЗЫВ ОФИЦИАЛЬНОГО ОППОНЕНТА

доктора технических наук Сорокина Федора Дмитриевича на диссертацию Коровайцевой Екатерины Анатольевны «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»

Оценка объема и структуры работы

Диссертация Е.А. Коровайцевой на соискание ученой степени доктора физико-математических наук состоит из введения, пяти глав, заключения и общих выводов, списка литературы, включающего 219 наименований публикаций отечественных и зарубежных авторов. Основное содержание изложено на 290 страницах, включает 13 таблиц и 169 рисунков.

Актуальность избранной темы

В названии диссертации говорится об оболочках из гиперупругих материалов, то есть таких оболочках, которые при нагружении внутренним давлением и другими нагрузками могут практически неограниченно изменять свои размеры и очень далеко удаляться от исходного состояния. Для краткости будем говорить о «гиперупругих оболочках». Стенки таких оболочек в большинстве случаев не могут нести изгибающие моменты, поэтому их также называют мягкими оболочками. Более того, без внутреннего давления у гиперупругих оболочек вовсе отсутствует определённая конфигурация. Такую оболочку можно сложить в компактный контейнер и отправить в космос. При подаче внутреннего давления оболочка развернётся и приобретёт необходимую форму. По этому принципу работают надувные тормозные устройства малых космических аппаратов, применяемых для увода вышедших из строя спутников в плотные слои атмосферы. Область применения мягких оболочек весьма обширна: воздухоплавание (дирижабли, парашюты),

Отдел документационного
обеспечения МАИ

21. 03 2024г.

космическая техника, робототехника, кораблестроение, спасательная техника, приборостроение, медицина, биомеханика и др. Однако расчет таких оболочек, который неизбежен на этапе проектирования конструкции, затруднен из-за сильной физической и геометрической нелинейности, так как размеры конструкции могут меняться во много раз. Рассматриваемая диссертация нацелена на выработку единых подходов к моделированию и созданию эффективных алгоритмов расчета оболочек из гиперупругих материалов при статических и динамических нагрузках, поэтому тема диссертации является **актуальной**.

Соответствие содержания диссертации заявленной специальности

Диссертация соответствует следующим пунктам паспорта специальности 1.1.8 «Механика деформируемого твердого тела»:

1. Законы деформирования, повреждения и разрушения материалов, в том числе природных, искусственных и вновь создаваемых.
2. Теория определяющих соотношений деформируемых тел с простой и сложной структурой.
8. Динамика деформируемого твёрдого тела. Теория волновых процессов в средах различной структуры.
9. Устойчивость процессов деформирования.
12. Вычислительная механика деформируемого твёрдого тела.

Степень разработанности темы, обоснованность научных положений и рекомендаций

На основе проведенного критического анализа известных способов описания механического поведения оболочек из гиперупругих материалов и существующих вычислительных методов, применяемых для их расчета, определено отсутствие на данный момент времени научно обоснованных решений, пригодных для рассмотрения формоизменения таких оболочек, при котором их размеры меняются в десятки и сотни раз. Поэтому в диссертации

выполнено комплексное исследование с целью разработки и развития математических моделей и методов решения задач деформирования тонкостенных оболочек вращения из гиперупругих материалов при произвольных перемещениях и деформациях. Построено несколько математических моделей, откорректированных и улучшенных по сравнению с существующими моделями с точки зрения эффективности построения вычислительных алгоритмов. Различные виды краевых задач, возникающие при рассмотрении гиперупругих оболочек, и вычислительные методы, применяемые для их решения, строго классифицированы (линейные и нелинейные краевые задачи, двухточечные и многоточечные, разветвлённые и неразветвлённые, с дополнительными параметрами и без них). Для каждого случая даются рекомендации и краткое изложение вычислительного алгоритма. Отметим, что выполненная классификация представляет ценность сама по себе, так как применима не только для гиперупругих оболочек, но и для обширного множества других механических объектов. Эффективность разработанных соискателем алгоритмов продемонстрирована на огромном количестве примеров для гиперупругих оболочек различной геометрии. Выработаны рекомендации по выбору параметров вычислительного процесса, таких как количество итераций, шаг по параметру и т.п.

Таким образом, сформулированная в диссертации цель достигнута, поставленные задачи решены полностью. Научные положения и сформулированные выводы вполне обоснованы.

Новизна и достоверность полученных результатов

Новые научные результаты, полученные в диссертации, заключаются в следующем:

1. Известные разрешающие соотношения, описывающие механическое поведение гиперупругих оболочек, существенно дополнены и адаптированы для их корректного применения при разработке вычислительных схем и на этапе программирования.

2. Различные виды краевых задач гиперупругих оболочек систематизированы и выработаны рекомендации по их рациональной алгоритмизации и численному решению.

3. Алгоритм решения нелинейных краевых задач, основанный на приеме продолжения по параметру, успешно адаптирован к расчету гиперупругих оболочек, что позволило рассматривать неограниченно большие перемещения и деформации, а также исследовать падающие участки упругих характеристик.

4. Решено множество новых задач статики для гиперупругих оболочек различной конфигурации с различными условиями закрепления при мембранных деформациях, достигающих 2000%, и поперечной кратности деформаций около 1/100, в том числе с локальным утонением.

5. Исследовано движение гиперупругих оболочек при внезапно приложенном и монотонно возрастающем давлении в том числе и с привлечением моментной теории оболочек (вариант В.Н. Паймушина).

6. Предложен и реализован метод автоматической сегментации, позволяющий существенно сократить количество численных экспериментов для получения требуемой точности расчета.

7. Выработан и успешно реализован критерии оценки точности расчета на основе сопоставления решений основной и сопряженной квазилинейных краевых задач и контроля взаимной ортогональности их решений.

Достоверность результатов, полученных соискателем, а также разработанных методов расчета гиперупругих оболочек, критериев точности, новых теоретических положений и выводов, сделанных в диссертации, обеспечивается корректным применением апробированных теоретических положений теории оболочек и механики гиперупругих материалов, сопоставлением с известными аналитическими решениями модельных задач, демонстрацией сходимости вычислительного процесса на основе очень большого количества численных экспериментов.

Теоретическая и практическая значимость диссертации

Теоретическая значимость диссертационной работы очевидна, она заключается в распространении теории мягких оболочек на случай неограниченно больших перемещений и деформаций, а также адаптации математических моделей гиперупругих оболочек к разработанным соискателем алгоритмам решения нелинейных краевых задач.

Практическая значимость работы заключается в том, что разработанные алгоритмы и комплексы компьютерных программ позволяют не только решать прикладные задачи из той области, которая заявлена в диссертации (осесимметричные гиперупругие оболочки в статике и динамике), но и задачи из других областей, например, из механики гибких стержней, где перемещения сопоставимы с габаритами конструкции. Практическая ценность разработанных алгоритмов подтверждена 3-мя свидетельствами о государственной регистрации программ для ЭВМ.

Достоинства и недостатки содержания и оформления диссертации и автореферата

Оформление диссертации и автореферата соответствует требованиям ГОСТ 7.0.11-2011 «Диссертация и автореферат диссертации. Структура и правила оформления». Автореферат диссертации в целом полностью отражает ее содержание. Список цитируемой в диссертации литературы из 219 наименований, в том числе 81 зарубежной публикации, свидетельствует о глубоком изучении соискателем рассматриваемой проблемы.

Основные результаты диссертации изложены в 29 научных работах, в том числе 12 научных статей опубликованы в изданиях, рекомендованных ВАК Министерства науки и высшего образования Российской Федерации, из них 5 в изданиях, входящих в международные реферативные базы данных и системы цитирования WoS и SCOPUS, а также соискателем получено 3 свидетельства о государственной регистрации программ для ЭВМ. Результаты

диссертационной работы достаточно хорошо апробированы на Всероссийских и Международных научных конференциях.

К достоинствам диссертации следует отнести:

1) хорошую структурную проработку и представление материала диссертационного исследования;

2) подробный и глубокий анализ существующих вариантов теории мягких оболочек, методов решения линейных и нелинейных краевых задач, различных вариантов выбора параметра в методе продолжения по параметру;

3) подробную систематизацию краевых задач, возникающих при расчете гиперупругих оболочек (линейные и нелинейные краевые задачи, двухточечные и многоточечные, разветвлённые и неразветвлённые, с дополнительными параметрами и без них);

4) предложенный и реализованный соискателем новый метод автоматической сегментации;

5) новый и интересный критерий оценки точности решения задач гиперупругих оболочек по контролю ортогональности решения основной и сопряженной квазилинейных систем дифференциальных уравнений, который может быть распространён и на другие объекты с большими перемещениями, например, на гибкие стержни;

6) очень большое количество примеров решения конкретных краевых задач для оболочек с различной исходной конфигурацией, различными условиями закрепления, различными упругими потенциалами материала, с учетом местного утонения и без него, с учетом моментного состояния и без него, в статике и в динамике;

7) достаточное тестирование разработанных алгоритмов и компьютерных программ на ряде примеров, имеющих аналитическое решение и на результатах других авторов.

К замечаниям по содержанию диссертации и автореферата относится следующее:

1. В диссертации несколько раз упоминались численные проблемы, возникающие в полусе 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.

Заключение

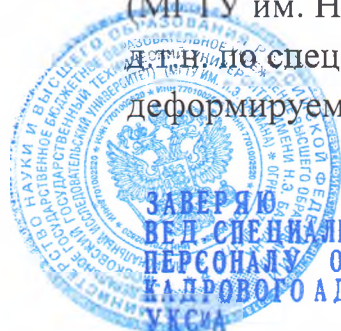
На основе анализа материалов диссертации и автореферата, а также замечаний, приведенных выше, можно сделать следующий вывод: диссертация Коровайцевой Екатерины Анатольевны «Моделирование процессов деформирования тонкостенных оболочек вращения из гиперупругих материалов» является законченной научно-квалификационной работой, в которой на основании выполненных автором исследований

разработаны теоретические положения, совокупность которых можно квалифицировать как крупное научное достижение в области разработки методов и алгоритмов расчета тонкостенных конструкций.

Диссертация «Моделирование процессов деформирования тонкостенных оболочек вращения из гиперупругих материалов» соответствует требованиям пунктов 9-11, 13, 14 «Положения о порядке присуждения ученых степеней» (постановление Правительства Российской Федерации от 24 сентября 2013 г. № 842), а ее автор Коровайцева Екатерина Анатольевна достойна присуждения ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 1.1.8 «Механика деформируемого твердого тела».

Профессор кафедры Прикладной механики
ФГБОУ ВО «Московский государственный
технический университет имени Н. Э. Баумана
(научно-исследовательский университет)»
(МГТУ им. Н. Э. Баумана),

д.т.н. по специальности 1.1.8 – Механика
деформируемого твердого тела, доцент



РУДНЕВА ИВ

Сорокин Фёдор Дмитриевич

«20» марта 2024 г.

Почтовый адрес: 2-я Бауманская, д. 5, г. Москва, 105005

Телефон: +7(916) 112-43-37

Электронная почта: sorokinf@bmstu.ru

Подпись профессора Ф. Д. Сорокина заверяю:

С отзывает специалист
ЕВ 21.03.2024