

УТВЕРЖДАЮ

Первый проректор РУТ (МИИТ)
кандидат философских наук



В.С. Тимонин

«10» ноября 2025 г

ОТЗЫВ ВЕДУЩЕЙ ОРГАНИЗАЦИИ

федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Российский университет транспорта» на диссертацию **Поповой Анастасии Руслановны** на тему «Моделирование нелинейных процессов деформирования неоднородных оболочек вращения при произвольных обобщенных перемещениях и деформациях», на соискание ученой степени кандидата технических наук по научной специальности 1.1.8. Механика деформируемого твердого тела

Актуальность темы диссертации

В настоящее время тонкостенные конструкции – оболочки и пластины различного очертания достаточно широко применяются не только в сложных технических системах авиакосмического назначения, машиностроительного производства и других отраслях народного хозяйства. Тонкостенные оболочечные фрагменты составляют значительный объем в дизайне форм строительных конструкций. Среди их многообразия наибольшее распространение получили тонкостенные конструкции тел вращения. Современные требования к методам проектирования таких конструкций включают необходимость анализа не только особенностей геометрии оболочки, но и учета нелинейностей различного характера (геометрического и физического), а также исследования особенностей деформирования перспективных конструкционных и новых строительных материалов. Особое внимание проектировщиков уделяется требованию к снижению

ОТДЕЛ КОРРЕСПОНДЕНЦИИ
И КОНТРОЛЯ ИСПОЛНЕНИЯ
ДОКУМЕНТОВ МАИ

«05» 12 2025 г.

материалоемкости и массовых характеристик изделий при обеспечении заданных параметров прочностной надежности несущих тонкостенных конструкций.

Для изучения особенностей деформирования пластин и оболочек при различных видах нагружения широко используется вычислительный эксперимент (ВЭ), заключающийся в исследовании реальных процессов механики методами вычислительной математики. Важнейшим этапом вычислительного эксперимента является разработка и развитие адекватных математических моделей, экономичных численных методов и алгоритмов, а также их практическая реализация в виде пакетов прикладных программ для ЭВМ, что существенно сокращает сроки проектных работ и дает возможность оптимизировать конструкцию по широкому спектру конструкционных, технологических, эксплуатационных и экономических требований. Рассматриваемые в диссертации проблемы в рамках нелинейных моделей методами вычислительного эксперимента являются *актуальными* и представляют прикладной и научный интерес в разработке новых тонкостенных конструкций из перспективных материалов в области авиастроения, атомной энергетики и других отраслей экономики.

Анализ текста диссертации

Диссертация изложена на 140 страницах и содержит 51 рисунок. Структура работы включает: введение, четыре главы, заключение (выводы), список литературы, содержащий 118 наименований и приложения, в котором представлены результаты практического внедрения проведенных исследований, а также распечатка текста разработанной программы SHELX на языке FORTRAN-IV.

Публикации. Основное содержание диссертации и ее результатов полностью отражено в 9-ти работах автора, в том числе: в двух статьях в рецензируемых научных изданиях по заявленной специальности, в одной статье журнала, индексируемого в Scopus, и в шести публикациях других изданий.

Во введении изложена актуальность темы диссертации, поставлена цель и определены задачи исследования, представлены научная новизна, теоретическая и практическая значимость полученных результатов, обоснована их достоверность, приведены сведения об общей структуре и объеме диссертационной работы.

В первой главе изложена сущность исследования процессов деформирования тонкостенных конструкций методами вычислительного эксперимента, заключающаяся в необходимости построения корректной математической модели и разработке аналитического или численного метода решения соответствующей краевой задачи. Представлен обзор и анализ литературных источников по теме диссертационной работы.

Сформулирована постановка задачи. Отмечено, что при моделировании напряженно-деформированное состояние (НДС) оболочек вращения при произвольных значениях обобщенных перемещений и деформаций в качестве неизвестных принимаются изменения декартовых координат. Приведены основные геометрические и физические соотношения оболочек вращения, арок и панелей при различных видах нагружения, уравнения обобщенного закона Гука и соотношения деформационной теории пластичности для исследуемых тонкостенных конструкций. Рассмотрены математические модели нелинейно упругих материалов. Приведены уравнения равновесия и граничные условия для однослойных и многослойных оболочек вращения из ортотропных и композиционных материалов, арочных и панельных конструкций. Дана формулировка краевой задачи для составной оболочечной конструкции, представленной из набора оболочек вращения, соединенных между собой достаточно жесткими кольцевыми элементами — шпангоутами.

Во второй главе дано обоснование применения вычислительного эксперимента для теоретического исследования процессов статического и динамического деформирования тонкостенных конструкций. Изложена методика вычислительного эксперимента и методы численного решения задачи.

Рассмотрены преимущества и недостатки методов конечных элементов (МКЭ) и конечных разностей (МКР). Для решения сеточных аналогов исходных дифференциальных уравнений, описывающих нелинейное деформирование тонкостенных конструкций, в диссертации разрабатываются эффективные и экономичные численные методы, построенные на основе явных разностных схем. Приведены особенности построения разностных схем для случая произвольных значений обобщенных перемещений и деформаций тонкостенных конструкций. Изложена сущность конечно-разностной аппроксимации параметров напряженного и деформированного состояния оболочек, арок и панелей, а также уравнений аппроксимации. Приведена методика построения разностных схем при решении физически нелинейных задач и расчете конструкций из гиперупругих материалов.

Третья глава диссертации посвящена разработке вычислительных алгоритмов решения нелинейных краевых задач. Изложена методика построения численного решения сеточных аналогов нелинейных уравнений равновесия тонкостенных конструкций методом установления. Определены оптимальные значения параметров итерационного процесса и разработаны вычислительные алгоритмы исследования параметров нелинейного НДС неоднородных оболочек вращения. Проведена верификация разработанных математических моделей и вычислительных алгоритмов.

В четвертой главе методами вычислительного эксперимента исследуются особенности процессов деформирования неоднородных оболочек вращения при произвольных обобщенных перемещениях и деформациях. Рассмотрены прикладные задачи и получены решения, в частности, геометрически и физически нелинейной краевой задачи при определении остаточных параметров НДС оболочки. Исследовано влияние физико-механических характеристик ортотропного материала на несущую способность трехслойного сферического купола при действии внешнего поверхностного давления. Рассмотрена реальная конструкция тепловыделяющего элемента под действием температурного поля и внутреннего давления. Полученные результаты

позволили установить диапазон значений параметров внутреннего давления в оболочке и определить предельное значение температуры в оболочке ТВЭЛа, при которой сохраняются прочностные свойства конструкции.

В качестве основных результатов диссертационного исследования следует выделить следующее:

1. Разработаны и развиты адекватные математические модели и эффективные численные алгоритмы решения геометрически и физически нелинейных краевых задач статики неоднородных оболочек вращения, позволяющие исследовать напряженно-деформированное состояние тонкостенных конструкций при произвольных значениях обобщенных перемещений и деформаций. Для расчета составных оболочечных конструкций разработана математическая модель, представляющая составную конструкцию в виде набора оболочек вращения и недеформируемых шпангоутов, что позволило упростить практическую реализацию силовых граничных условий для деформированного состояния оболочки.

2. При построении дискретных моделей разработаны оригинальные конечно-разностные аналоги исходных дифференциальных уравнений, позволяющие исследовать особенности нелинейного деформирования оболочек на основе однотипных конечно-разностных операторов второго порядка точности как для исходного, так и деформированного состояния, а также разработана оригинальная процедура дискретизации параметров НДС оболочек вращения, содержащих полюсные точки, и построены однотипные дискретные модели для вычисления силовых факторов при решении физически нелинейных задач, а также при расчете оболочек из нелинейно адаптированной квазидинамической формы метода установления для упругих материалов.

3. На основе решения полученной системы сеточных уравнений построен единый вычислительный алгоритм для численного решения геометрически и физически нелинейных краевых задач статики оболочек при произвольных значениях обобщенных перемещений и деформаций. Рассмотрены особенности

построения итерационного процесса при действии консервативной и «следящей» нагрузки, а также получены формулы для оценки оптимальных (с точки зрения сходимости и устойчивости разностной схемы) значений параметров итерационного процесса.

4. Вычислительный эксперимент практически реализован в пакете прикладных программ «SHELX» на языке FORTRAN-IV, что позволило исследовать особенности процессов деформирования оболочек вращения при произвольных значениях обобщенных перемещений и деформаций.

Получены следующие **новые научные результаты**:

1. Разработаны и развиты корректные математические модели и эффективные численные алгоритмы решения геометрически и физически нелинейных краевых задач статики неоднородных оболочек вращения, позволяющие исследовать особенности процессов деформирования тонкостенных конструкций при произвольных значениях обобщенных перемещений и деформаций.

2. Разработана математическая модель для расчета составных оболочечных конструкций, представляющая конструкцию в виде набора оболочек вращения и недеформируемых шпангоутов, что позволило упростить практическую реализацию силовых граничных условий для деформированного состояния оболочки.

3. Разработана и реализована оригинальная конечно-разностная процедура дискретизации параметров НДС купольных оболочек вращения, содержащих полюсные точки, а также построены однотипные дискретные модели для вычисления силовых факторов при решении физически нелинейных задач, а также при расчете оболочек из нелинейно упругих материалов.

4. На основе квазидинамической формы метода установления построен единый вычислительный алгоритм для численного решения геометрически и физически нелинейных краевых задач статики оболочек при произвольных значениях обобщенных перемещений и деформаций, а также рассмотрены

особенности построения итерационного процесса при действии консервативной и «следящей» нагрузки.

5. Построены вычислительные алгоритмы исследования нелинейного напряженно-деформированного состояния неоднородных оболочек вращения при термомеханических воздействиях, позволившие установить диапазон значений параметров внутреннего давления в оболочке, повышающий порог предельной температуры в оболочке ТВЭЛа на 5,9% при совместном действии температурного поля и внутреннего давления.

Рекомендации по использованию результатов и выводов

Значимость результатов, полученных автором диссертации, заключается в развитии численных методов в решения нелинейных краевых задач теории упругости, расширении области их применения в механике деформируемого твердого тела, а также в строительной механике и других смежных научных специальностях, построении адекватных расчетных моделей для исследования напряженно-деформированного состояния реальных технических конструкций, обусловленного различным силовым воздействием.

Анализ диссертации позволяет сделать следующие **замечания**.

1. Приведенный обзор литературных источников по заявленной тематике, в том числе и список литературы, не включает научные работы других авторов за период с 2010 по 2024 годы, что приводит к неполному анализу современного состояния научной проблемы и возможных путей ее решения в настоящий момент стремительного развития электронно-вычислительных средств и программно-аппаратных комплексов.

2. Раскрывая сущность численного решения сеточных аналогов нелинейных уравнений равновесия тонкостенных конструкций методом установления, автор использует следующий подход (диссертация, стр. 59): – «При переходе к эволюционной задаче уравнения (2.15) заменяются на нестационарные уравнения, совпадающие по форме с уравнениями движения оболочки в вязкой среде [38,39,80,108]. В построении вычислительного алгоритма при расчете составных оболочечных конструкций автор при

определении оптимальных значений параметров итерационного процесса делает следующее заключение (диссертация, стр. 68): – «Для первоначального приближения полагается, что вязкость ε_m равна величине искусственной вязкости для оболочки в направлении координаты x : $\varepsilon_m = \varepsilon_1$. Результаты проведенных исследований показали достаточную эффективность такой оценки.». Результаты этих исследований в диссертации не приведены, отсутствует ссылка на другие источники.

3. В параграфе «§ 3.5. Верификация разработанных математических моделей и вычислительных алгоритмов» (стр. 68-69) сказано, что: – «Для модели «МВ» для определения усилий и моментов в предположении линейного распределения деформаций по толщине оболочки были получены аналитические выражения, связывающие усилия и изгибающие моменты с компонентами деформаций и изменениями кривизны.». При этом сами выражения не приведены.

4. Замечания по оформлению. В тексте диссертации и автореферата имеются орфографические и стилистические ошибки.

Указанные замечания не оказывают принципиального влияния на общую положительную оценку работы, ее новизну и практическую значимость.

Материал диссертации изложен в строгой логической последовательности достижения цели исследования и решения поставленных задач. Автореферат в полной мере отражает содержание диссертации.

Диссертация соответствует паспорту научной специальности 1.1.8. Механика деформируемого твердого тела.

Заключение

Диссертация Поповой Анастасии Руслановны на тему «Моделирование нелинейных процессов деформирования неоднородных оболочек вращения при произвольных обобщенных перемещениях и деформациях» на соискание ученой степени кандидата технических наук является научно-квалификационной работой, в которой содержится решение научной задачи исследования нелинейных процессов деформирования неоднородных оболочек

вращения при произвольных обобщенных перемещениях и деформациях, имеющей научное значения для развития отрасли знаний — механика, что отвечает требованиям «Положения о порядке присуждения ученых степеней», утвержденного Постановлением правительства Российской Федерации от 24.09.2013 г. № 842, а ее автор Попова А.Р. заслуживает присуждения ученой степени кандидата технических наук по специальности 1.1.8. Механика деформируемого твердого тела (технические науки).

Отзыв ведущей организации рассмотрен, обсужден и одобрен по результатам рассмотрения диссертации на заседании кафедры «Транспортное строительство» 5 ноября 2025 г. протокол № 5А.

Заведующий кафедры «Транспортное строительство», доктор физико-математических наук, профессор



Локтев Алексей Алексеевич

Доцент кафедры «Транспортное строительство», кандидат технических наук, доцент



Королев Вадим Вадимович

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Российский университет транспорта»
Адрес: 127994, ГСП-4, г. Москва, ул. Образцова, д. 9, стр. 9.
Тел.: +7 495 681-13-40
E-mail: tu@miit.ru

Я, Локтев Алексей Алексеевич, даю согласие на включение своих персональных данных в документы, связанные с работой диссертационного совета, и их дальнейшую обработку.



Локтев Алексей Алексеевич

Я, Королев Вадим Вадимович, даю согласие на включение своих персональных данных в документы, связанные с работой диссертационного совета, и их дальнейшую обработку.



Королев Вадим Вадимович

С отзывами ознакомлена 05.12.2025 