

УТВЕРЖДАЮ

Заместитель управляющего директора –
главный конструктор ОКБ
АО «Казанский вертолетный завод»



А.О. Гарипов

« 10 » 03 2021 г.

ОТЗЫВ

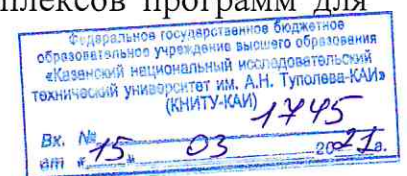
Акционерного общества «Казанский вертолетный завод» на диссертационную работу Луканкина Сергея Анатольевича на тему **«Уточненные математические модели статического деформирования и устойчивости многослойных оболочечно-стержневых конструкций и высокоточные численные методы их исследования»**, представленную на соискание ученой степени доктора технических наук по специальности 05.13.18 – «Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ»

Актуальность темы диссертационной работы.

С применением композиционных материалов ожидают получать конструкции, обладающих большей весовой отдачей, высокими прочностными и ресурсными показателями, при этом хотят получить требуемую степень технологичности и минимальную трудоемкость изготовления. Все эти преимущества применения композиционных материалов не приходят сами с собой. Это путем кропотливого труда конструктора и технолога потенциально можно получить желаемую минимальную трудоемкость в производстве и прекрасные ресурсные и прочностные характеристики в эксплуатации. Не обойтись в данном случае и без глубокого анализа напряженно-деформированного состояния конструкции. Для этого особенно актуальна разработка расчетных методов достоверного определения пределов несущей способности и ресурсного потенциала разрабатываемых конструкций на этапе проектирования изделия. Поэтому разработка быстродействующих и высокоточных методов и реализующих их программных комплексов по механике деформирования и устойчивости стержневых и оболочечных элементов и составленных из них конструкций является актуальной задачей.

Целью исследования

диссертационной работы является создание новых высокоточных методов и численных математических моделей, реализация комплексов программ для



моделирования процессов статического деформирования и определения устойчивости пространственных конструкций.

Оценка содержания и структуры работы

Диссертация состоит из введения, восьми глав, заключения и списка литературы. Содержание и структура диссертации соответствует выполненной работе и решениям задач исследования.

Во введении

обоснована актуальность темы диссертации, определена цель исследования, сформулирована научная новизна, практическая значимость и основные положения диссертации, выносимые на защиту и определен личный вклад автора диссертации. Показано соответствие диссертации научной специальности. Приведено краткое описание выполненной работы, сведения об апробации работы и ее публикации.

В первой главе

введен аппарат бескомпонентного тензорного анализа, позволяющий избежать излишней громоздкости индексов при получении довольно сложных соотношений дискретно-структурных моделей. Требуемая для численной реализации соотношений математической модели компонентная форма представления соотношений легко достигается на последнем этапе построения посредством координатного изоморфизма используемых линейных пространств. Проведена классификация математических моделей механики деформирования многослойных оболочек со слоями переменной толщины, которые разделены на шесть групп. В основе классификации лежат:

- 1) параметр, характеризующий относительную толщину слоя пакета оболочки (или относительную толщину многослойной оболочки в целом);
- 2) два параметра, характеризующие изменчивость функций толщин слоев оболочки (или толщины оболочки в целом) в тангенциальных направлениях.

Эффективность использования предложенной классификации проиллюстрировано на примере построения законов распределения трансверсальных напряжений в поперечном направлении в трансверсально-мягком слое.

Во второй главе

построена замкнутая система соотношений нелинейной комбинированной дискретно-структурной математической модели статического деформирования и устойчивости многослойных оболочек со слоями сложной геометрии, которая удовлетворяет требованиям корректного описания механизмов потери устойчивости реальных многослойных оболочечных элементов конструкций. В качестве физического объекта принят выделенный из конструкции многослойный оболочечный фрагмент, все функции которого,

характеризующие внутреннюю геометрию, свойства и внешнее воздействие, полагаются гладкими. Механика деформирования жестких слоев оболочки описывается классической кинематической моделью Кирхгофа-Лява для случая среднего изгиба, или они рассматриваются, как безмоментные. Для моделирования заполнителей используются уравнения трехмерной теории упругости, упрощенные в рамках модели трансверсально-мягкого слоя. Такой подход позволяет пренебречь в уравнениях равновесия для заполнителей тангенциальной частью тензора напряжений и получить прямым интегрированием законы распределения в поперечном направлении векторов перемещения точек заполнителей и параметров НДС.

Третья глава

посвящена разработке нового высокоэффективного численного метода решения одномерных краевых задач статики оболочек типа С.П.Тимошенко, который имеет в своей основе Лагранжеву гибридную конечно-элементную схему. Разработан численный метод решения двумерных краевых задач механики деформированного твердого тела. В основу метода положена процедура предварительного сведения исходной краевой задачи к эквивалентной интегральной форме относительно одной из независимых переменных в рамках подхода Канторовича, который применяется для преобразования двумерной краевой задачи к системе одномерных интегральных уравнений. Показано что такой подход обладает более высокой устойчивостью по сравнению с дискретизацией дифференциальных уравнений, не содержит производных от функций и не налагает ограничений на их гладкость, допуская существование разрывных решений. Метод использует в направлении плавного решения вычислительную схему Галеркина-Петрова, а в противоположном – конечно-элементную схему с численным интегрированием. В главе приводится замкнутая система двумерных соотношений. Разработана проекционная схема дискретизации линейных дифференциальных уравнений. Проведено построение гибридного суперэлемента. Решена проблема выбора базисных и проекционных функций.

Четвертая глава

посвящена разработке алгоритмов высокоточного вычислительного метода и реализующее их программное обеспечение для выявления и исследования всех возможных классических и неклассических функций потери устойчивости при действии произвольной нагрузки. Разработанный численный метод использует модифицированный метод интегрирующих матриц. Интегральное представление позволяет естественным образом исключить производные функций, входящих в состав коэффициентов при неизвестных, и этим снизить требования к их гладкости. Алгоритм разработанного численного метода для построения матричных аналогов интегральных операторов (модифицированных интегрирующих матриц)

использует вариант квадратурных формул, базирующийся на аппроксимации функций неизвестных полиномами Лагранжа на неравномерной сетке, в качестве узлов которой выбираются нули соответствующих полиномов Лежандра. Показана точность операции численного интегрирования при использовании модифицированных интегрирующих матриц.

В пятой главе

разработан численный метод исследования задач устойчивости цилиндрических оболочек типа С.П. Тимошенко, который позволяют выявить и исследовать все возможные классические и неклассические функции потери устойчивости. Численное решение указанных задач осуществляется в два этапа. На первом этапе решается задача статики и определяются параметры докритического напряженно-деформированного состояния, а на втором этапе решается задача устойчивости. Для дискретизации краевой задачи используется модифицированный метод интегрирующих матриц. При этом дискретный алгебраический аналог краевой задачи с помощью специально разработанной процедуры приводится к симметричному виду.

В шестой главе

представлены исследования неклассических форм потери устойчивости цилиндрической оболочки, и их сравнении с результатами других авторов. Для этого разработаны алгоритмы и реализующая их вычисленная процедура, для выявления и исследования потери устойчивости цилиндрических оболочек при действии внешнего давления. В расчетах моделировалась потеря устойчивости цилиндрических оболочек различных классов: длинных тонких оболочек, тонких оболочек средней длины, тонких коротких оболочек и коротких оболочек средней толщины.

В седьмой главе

выведены уравнения кинематического сопряжения стержневых и оболочечных подструктур, уравнения докритического равновесия и устойчивости для рассматриваемых конструкций. Проведено численное моделирование потери устойчивости составной конструкции, состоящей из прямоугольной ортотропной пластины и шарнирно связанного с ней по одной из кромок подкрепляющего прямолинейного стержня. При сохранении и отбрасывании в соотношениях для оболочек групп параметрических слагаемых по разработанной вычислительной процедуре проведено исследование устойчивости конструкции рассматриваемого класса в случае действия на шпангоут внешнего давления, скручивающего момента, а также в случае ее осевого растяжения, при котором шпангоут оказывается в условиях деформации «выворачивания».

В восьмой главе

в рамках математического моделирования механики деформирования зон законцовок трехслойных панелей из полимерных композиционных материалов разработан вычислительно-экспериментальный метод определения достоверных значений физико-механических и прочностных характеристик трансверсально-мягких заполнителей. Проведен анализ, в том числе и численный по разработанной вычислительной процедуре, схем и конструктивных параметров тест-образцов при испытании заполнителей на сдвиг. Разработанная вычислительно-экспериментальная методология построения диаграммы деформирования заполнителя при сдвиге использует данные экспериментальной диаграммы, построенной в процессе испытания тест-образца, на основе которой расчетным способом с помощью разработанной вычислительной процедуры строится диаграмма деформирования и определяются достоверные значения физико-механических и прочностных характеристик заполнителя.

В заключении

сформулированы основные выводы и результаты диссертационной работы.

Структура, объем и основное содержание диссертационной работы соответствует требованиям, предъявляемым к научным квалификационным трудам.

Соответствие автореферата диссертации ее содержанию

Автореферат диссертации соответствует содержанию диссертационного исследования в полном объеме.

Достоверность научных результатов

подтверждается корректным использованием методов исследования, сравнением результатов решения тестовых задач с материалами исследований других авторов, а также соответствием результатов моделирования экспериментальным данным.

Теоретическая значимость

диссертации заключается в разработке нового подхода и методологии формирования математических моделей деформирования и устойчивости составных оболочечно-стержневых конструкций с многослойными оболочечными элементами сложной геометрии.

Практическая значимость

заключается в разработке высокоточных численных методов, разработке методов определения достоверных значений физико-механических и прочностных параметров композитных материалов и разработке эффективных алгоритмов формирования дискретных аналогов уравнений моделей.

Разработанные комплексы программ могут служить поверочным программным обеспечением, а результаты расчетов использованы в качестве эталонных.

Замечания по диссертационной работе:

1. В связи с нечетким обозначением на рисунке 5 количества сечений по оси абсцисс, возникает путаница при оценке точности вычислений модифицированной интегрирующей матрицей.
2. Из автореферата не ясно, как решалась задача устойчивости оболочек в рамках динамического критерия. Рисунок 7 не в полной мере иллюстрирует исследование оболочек в рамках динамической постановки задачи устойчивости.
3. Неоправданно малый объем описания к Главе 8 в автореферате не позволяет понять очень важный для практического применения вопрос распределения касательных напряжений в «законцовке» композитной трехслойной панели и значимость расчетно-экспериментальной методологии определения физико-механических характеристик заполнителя на основе результатов испытания тест-образца. Особый интерес представляет критерии потери устойчивости S-образного нижнего слоя «законцовки» трехслойной панели.

Следует отметить, что вышеперечисленные замечания не затрагивают основные положения диссертационной работы, выносимые на защиту, не снижают научно-практическую значимость проведенных автором исследований.

Заключение

Диссертация Луканкина С.А. «Уточненные математические модели статического деформирования и устойчивости многослойных оболочечно-стержневых конструкций и высокоточные численные методы их исследования», выполнена на высоком научном уровне, представляет законченное научное исследование и соответствует требованиям «Положения о присуждении научных степеней», утвержденного Постановлением Правительства Российской Федерации от 24.09.2013 г., а ее автор Луканкин Сергей Анатольевич заслуживает присвоения ему ученой степени доктора технических наук по специальности 05.13.18 – «Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ».

Начальник отдела прочности и аэродинамики
АО «Казанский вертолетный завод»
кандидат технических наук

 Е.И. Николаев

Николаев Евгений Иванович

научная специальность 05.07.03 – Прочность и тепловые режимы летательных аппаратов

АО «Казанский вертолетный завод»

420006, г. Казань, ул. Тэцевская, 14

тел. +7(843)549-66-99

Электронная почта: kvz@kazanhelicopters.com

Сайт: <https://www.rhc.aero/structure/kazanskiy-vertoletnyy-zavod>