

ОТЗЫВ ОФИЦИАЛЬНОГО ОППОНЕНТА

на диссертацию Белова Сергея Викторовича
«Метод расчета напряженно-деформированного состояния
вантово-оболочечных конструкций с поиском начальной формы
вантовой сети», представленную на соискание
ученой степени кандидата физико-математических наук
по специальности 01.02.04 – Механика деформируемого твёрдого тела

Диссертационная работа С.В. Белова посвящена развитию метода решения краевых задач для прогноза поведения упругих вантово-оболочечных конструкций при конечных перемещениях. Работа направлена на предупреждение недопустимых деформаций перспективных конструкций сетчатых рефлекторов.

Актуальность темы диссертации. Объект исследования – вантово-оболочечные конструкции – класс силовых конструкций, применяемых в качестве силовых каркасов лёгких изделий, в первую очередь – рефлекторов антенн космических аппаратов. К таким конструкциям предъявляются повышенные требования по массовой эффективности и по точности формы после развёртывания из транспортного положения. Поэтому проектирование таких конструкций требует высокоточного расчёта напряжённо-деформированного состояния при конечных перемещениях от заданного начального состояния, характеризующегося силами натяжения вантовых элементов. Геометрическая нелинейность деформирования приводит к необходимости решения нелинейных уравнений равновесия и отыскания бифуркаций (проверки потери устойчивости). Высокая податливость вантово-оболочечных конструкций затрудняет использование традиционных методов решения нелинейных задач об упругом деформировании в различных формулировках метода перемещений. Поэтому при использовании многочисленных современных программных комплексов во многих случаях либо не удаётся определить равновесную форму с достаточной точностью, либо требуются неприемлемые затраты вычислительных ресурсов.

Таким образом, тема диссертации С.В. Белова, в которой ставится цель разработки комбинированного метода расчёта нелинейного деформирования вантово-оболочечных конструкций, должна быть признана актуальной для методического обеспечения проектировочных расчётов.

Содержание работы. Диссертация изложена на 141 странице и состоит из введения, четырёх глав, заключения, списка использованных источников из 87 наименований, списка сокращений и двух приложений, содержит 82 рисунка и 8 таблиц.

Во введении содержится краткая характеристика работы. Обоснована актуальность темы исследования, сформулированы цель и задачи работы, охарактеризованы методы исследования, научная новизна, значимость и достоверность результатов диссертации. Приведены положения, выносимые на

защиту, а также сведения об апробации результатов исследования, о личном участии автора в получении результатов, информация о структуре работы и краткое содержание по главам.

Глава 1 содержит квалифицированно выполненный обзор известных методов решения геометрически нелинейных задач механики деформируемого твердого тела применительно к рассматриваемым объектам – вантово-оболочечным конструкциям. Наибольшее внимание уделено методам поиска равновесных форм вантовых сетей. Обосновывается выбор комбинации метода плотности сил и метода конечных элементов как основы для дальнейшей разработки и формулируется решаемая краевая задача.

В главе 2 описан разработанный комбинированный метод расчёта напряжённо-деформированного состояния вантово-оболочечных конструкций, включающий два этапа: определение начальной формы сети, удовлетворяющей условиям равновесия, и уточнение перемещений с учётом упругих деформаций каркаса и оболочки.

На первом этапе рассматривается только вантовый каркас, в котором варьируемыми неизвестными считаются натяжения, отнесенные к длинам вантовых элементов («плотности сил»). Уравнения равновесия, записанные относительно координат узлов, решаются совместно с ограничениями, накладываемыми на натяжения. В результате определяется одна из равновесных форм; единственность решения доказывается в том смысле, что существует ровно одно решение, минимальное по норме. Это представляется достаточным для практического использования, поскольку целью на данном этапе является только получение начального приближения. Для устранения влияния плохой обусловленности в алгоритм численного решения введено использование псевдообратной матрицы Мура-Пенроуза.

На втором этапе для уточнения перемещений используется известная схема решения системы нелинейных алгебраических уравнений методом Ньютона, дополненная последовательным изменением кинематических граничных условий. Описана программная реализация в среде ANSYS. Утверждается, что начальное приближение в виде равновесной формы гарантированно принадлежит области сходимости построенного алгоритма.

Следует особо отметить, что предложенный двухэтапный подход является не только инструментом исследования, но и способом определения проектных параметров конструкции – длин и/или сил натяжения вантов, т.е. расчёт напряжённо-деформированного состояния конструкции совмещён с проектировочным расчётом. Искомые проектные параметры определяются из дополнительных ограничений, накладываемых на усилия в элементах крепления, на длины этих элементов в исходном или деформированном состоянии и на реакции в закреплённых узлах. Следует заметить, что в тексте диссертации многократно встречается указание на рациональность

выравнивания натяжений в элементах сети, но задача оптимизации явно не ставится, и поэтому выбор вида ограничений не затрагивается.

Глава 3 посвящена решению прикладных задач расчёта упругих деформаций вантово-оболочечных конструкций сетчатых рефлекторов космических аппаратов при статическом воздействии.

Приведена краткая классификация рассматриваемых конструктивных вариантов сетчатых рефлекторов и характеристика критериев их качества: точность формы с учётом упругих деформаций, известная оценка влияния отклонений формы на коэффициент усиления антенны. Изложены качественные соображения о влиянии натяжения вантов на погрешность формы рефлектора. Основная часть главы содержит получение количественных оценок параметров напряжённо-деформированного состояния по методике главы 2. Расчёты выполнены для зонтичных, офсетных и ободных рефлекторов. Исследована сходимострассчитываемых величин по итерациям. Получена оценка времени вычислений и показано, что выбор начального приближения по авторской методике уменьшает время расчёта и одновременно уменьшает погрешность.

В главе 4 решаются задачи статической устойчивости и колебаний рефлекторов с учётом влияния натяжения вантов.

В силу существенной разнородности конструктивных элементов (стержней и нитей) анализ проведен не только для конструкции в целом, но и для отдельных её элементов. Показано, что нелинейность деформирования приводит к снижению критических нагрузок по сравнению с результатами, получаемыми на линейных моделях, что является дополнительным аргументом в пользу развиваемого в диссертации подхода. Высокая податливость конструкции и нелинейность деформирования затрудняют традиционное вычисление критической нагрузки как собственного числа пары матриц – «обычной» жесткости и геометрической жесткости: эти матрицы нелинейно зависят от докритических перемещений. Поэтому автор использует следующую оценку: за критическую принимается нагрузка, увеличение которой на заданный шаг приводит к росту перемещений в заданное число раз. Критериальные величины выбираются автором для каждого расчёта. Заметим, что при таком подходе получается нижняя оценка критической нагрузки, т.е. погрешность идёт «в запас».

Собственные частоты и формы свободных колебаний определяются в предположении, что конструкция предварительно напряжена, а амплитуды свободных колебаний малы по сравнению со статическими перемещениями. Нелинейные члены в переменных по времени деформациях не учитываются. Такие предположения, традиционно принимаемые при анализе малых колебаний податливых конструкций, требуют точного определения начальной формы и начальных напряжений. В п. 4.4 вполне закономерно ставится вопрос о влиянии выбора равновесной формы – с использованием и без использования

расчёта методом плотности сил – на оценки частот и форм свободных колебаний. Найдено, что для зонтичных рефлекторов различие оценок первой частоты составляет 0,3%. Сопоставление оценок частот для других конструктивных вариантов не приводится. Для ободного рефлектора получен практически значимый вывод об отсутствии улучшения точности формы при увеличении толщины обода.

В **заключении** описаны основные результаты работы и сформулированы выводы.

В **приложение** вынесены числовые данные вспомогательного характера.

Оценка научной новизны, достоверности результатов и практической значимости результатов.

Наиболее существенным результатом диссертации является разработка метода, совмещающего расчёт напряжённо-деформированного состояния нелинейно деформируемых вантово-оболочечных конструкций с определением рациональных проектных параметров для достижения устойчивой деформированной формы, мало отличающейся от теоретической поверхности.

Следующие результаты работы обладают **научной новизной**:

1) усовершенствован алгоритм поиска начальной формы вантовой сети при вырожденной или плохо обусловленной матрице системы разрешающих уравнений путём использования псевдообратной матрицы Мура-Пенроуза;

2) усовершенствован алгоритм расчёта напряжённо-деформированного состояния при нелинейной деформации вантово-оболочечной конструкции из начальной равновесной формы;

3) показана работоспособность и эффективность разработанного метода для исследования стационарного напряжённо-деформированного состояния, устойчивости и малых свободных колебаний зонтичных, офсетных и ободных рефлекторов антенн космических аппаратов;

4) определены рациональные параметры начального натяжения и получены оценки напряжений, собственных частот и запасов по устойчивости для новых конструкций рефлекторов.

Эти результаты являются **значимыми** для прогноза поведения и предупреждения недопустимых деформаций перспективных конструкций предварительно напряжённых сетчатых рефлекторов при их проектировании.

Практическая ценность диссертации состоит в возможности использования разработанных математических моделей, постановок краевых задач и алгоритмов численного решения при рациональном проектировании крупногабаритных вантово-оболочечных конструкций. Практическая значимость подтверждается использованием результатов диссертации при разработке новой космической техники – в совместных работах с АО «Информационные спутниковые системы» им. ак. М.Ф. Решетнева», а также в рамках Федеральной целевой программы «Исследования и разработки по

приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России на 2014–2020 годы».

Степень обоснованности выводов и рекомендаций. Достоверность результатов диссертации обеспечивается корректным применением апробированных методов и постановок задач механики деформируемого твердого тела, исследованием сходимости алгоритмов численного решения, и подтверждается согласованием результатов расчётов с данными, полученными независимыми расчётами по другим методам.

Рекомендации по использованию результатов и выводов диссертации. Разработанный метод может быть рекомендован для расчета podatlivykh конструкций, работающих при больших деформациях: сетчатых антенных рефлекторов космических аппаратов, а также тентов, вантово-оболочечных кровель зданий и т.д. при их проектировании. Рекомендуется внедрение результатов диссертации в АО «Информационные спутниковые системы» им. акад. М.Ф. Решетнева», АО «Центральный научно-исследовательский институт специального машиностроения», а также в проектных и научно-исследовательских организациях строительного комплекса: ООО «Проектный строительный институт «Промгражданпроект», ОАО «Сибгипротранс» и др.

По содержанию диссертации имеются следующие **замечания**:

1. При формулировке математических моделей сетчатых конструкций не описываются кинематические условия сопряжения элементов – шарнирное или жесткое соединение, и не указано функциональное пространство, в котором находится решение. Это затрудняет анализ корректности математических постановок задач.

2. В формуле (1.20) использовано нетрадиционное обозначение обращения матрицы (записано в виде деления матрицы на матрицу). Следовало бы пояснить это обозначение в тексте.

3. В пояснении к интерполяционной формуле (1.36) утверждается, что узловые значения интерполируемой функции – это приближенное решение, а результат интерполяции – точное решение; однако интерполяция вносит дополнительную погрешность в данные, которые сами являются приближёнными.

4. На странице 49 имеется неточность: «На рисунке 2.2 показаны графики спектров собственных значений матрицы в зависимости от их номера». В действительности спектр матрицы в виде одного графика приведен на рисунке 2.3. Неясно, что имеется в виду под «номером спектра».

5. Неочевиден выбор критериальных значений приращения нагрузки и увеличения отклика при вычислении запаса по устойчивости. Это не

принципиально для обеспечения работоспособности конструкции, поскольку погрешность идёт «в запас», но величина погрешности остаётся невыясненной.

6. В отдельных случаях недостаточно чётко разделяются свойства реального объекта и модельные представления. Так, на странице 14 из утверждения: «у зонтичной конструкции значения её собственных частот были незначительно выше по сравнению со случаем, где решения метода плотности сил не использовались» можно понять, что метод расчёта влияет на собственные частоты конструкции. Следовало бы уточнить, что решения, полученные методом плотности сил, используются для выбора начальных натяжений, которые влияют на собственные частоты.

Отмеченные недостатки не являются принципиальными и не снижают научную и практическую значимость результатов, полученных в диссертации.

Заключение о соответствии диссертации критериям, установленным Положением о порядке присуждения ученых степеней

Диссертация Белова Сергея Викторовича «Метод расчета напряженно-деформированного состояния вантово-оболочечных конструкций с поиском начальной формы вантовой сети», представленная на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук, является законченной научно-квалификационной работой, в которой содержится новое решение актуальной научной задачи расчётно-теоретического прогноза нелинейного поведения упругих вантово-оболочечных конструкций, имеющей значение для развития механики сетчатых конструкций.

Диссертация по области исследования соответствует паспорту специальности 01.02.04 – Механика деформируемого твёрдого тела: п. 2 «Теория моделей деформируемых тел с простой и сложной структурой», п. 7 «Постановка и решение краевых задач для тел различной конфигурации и структуры при механических, электромагнитных, радиационных, тепловых и прочих воздействиях, в том числе применительно к объектам новой техники», п. 8 «Математические модели и численные методы анализа применительно к задачам, не допускающим прямого аналитического исследования».

Работа оформлена в соответствии с требованиями, установленными ВАК Министерства науки и высшего образования Российской Федерации. Содержание автореферата даёт достаточно полное представление о содержании диссертации.

По теме диссертации соискателем опубликовано 14 работ, в том числе 3 статьи в научных изданиях, включенных в Перечень рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные результаты диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание ученой

степени доктора наук, и 5 статей в изданиях, индексируемых в базах Scopus и Web of Science.

Диссертация соответствует критериям п. 9 «Положения о присуждении ученых степеней», утверждённого постановлением Правительства Российской Федерации от 24 сентября 2013 г. № 842 (в редакции от 01.10.2018), для диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук. Автор работы заслуживает присуждения ему учёной степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.02.04 – Механика деформируемого твёрдого тела.

Официальный оппонент:

заведующей научно-исследовательской лабораторией математического моделирования Новокузнецкого института (филиала) федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Кемеровский государственный университет»,
доктор технических наук (01.02.06 – Динамика, прочность машин, приборов и аппаратуры), профессор



Каледин Валерий Олегович

«04» декабря 2019 г.

Подпись профессора Каледина В.О. удостоверяю.

Начальник кадровой службы




Сведения об организации: Новокузнецкий институт (филиал) Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Кемеровский государственный университет»;
юридический адрес: 650043, г. Кемерово, ул. Красная, 6,
e-mail: rector@kemsu, официальный сайт организации: www.kemsu.ru,
тел. организации: (3842) 58-12-26;
почтовый адрес: 654041, г. Новокузнецк, ул. Циолковского, д. 23,
e-mail: root@nbikemsu.ru, официальный сайт организации: https://nbikemsu.ru,
тел. организации (3843) 77-60-54.