



Федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение
высшего образования

«Московский государственный
технический университет имени Н.Э. Баумана
(национальный исследовательский университет)»
(МГТУ им. Н.Э. Баумана)

105005, г. Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1
Тел. (499) 263-63-91 Факс (499) 267-48-44
E-mail: bauman@bmstu.ru
ОГРН 1027739051779
ИНН 7701002520 КПП 770101001

«УТВЕРЖДАЮ»

Первый проректор – проректор по научной
работе федерального государственного
бюджетного образовательного учреждения
высшего образования «Московский
государственный технический университет
имени Н.Э. Баумана (национальный
исследовательский университет)»
(МГТУ им. Н.Э. Баумана), д.т.н., с.н.с.



В. Н. Зимин

2019 г.

№ _____
на № _____ от _____

ОТЗЫВ ВЕДУЩЕЙ ОРГАНИЗАЦИИ

Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана (национальный исследовательский университет)» (МГТУ им. Н.Э. Баумана) 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 твердого тела

Актуальность темы исследования диссертации. Вантово-оболочечные конструкции получили широкое распространение при строительстве крыш стадионов, вантовых мостов, космических трансформируемых сетчатых рефлекторных антенн и других строительных сооружений. Работа с реальными конструкциями требует высоких временных и финансовых затрат. Поэтому создание и развитие адекватных моделей расчета их напряженно-деформированного состояния (НДС) является весьма актуальной задачей. Кроме того, в расчетной модели важно

учитывать свойство геометрической нелинейности. НДС рассматриваемых конструкций описывается нелинейной системой уравнений теории упругости, где главным является уравнение равновесия относительно перемещений или напряжений. Для этого уравнения по-прежнему актуальны методы численного решения, так как аналитические выражения могут быть получены только в самых простых случаях. В настоящее время широко используются численные методы, основанные на комбинации методов конечных элементов (МКЭ) и плотности сил (МПС). Под плотностью силы понимается постоянная величина, равная отношению натяжения вантового элемента к его длине. Комбинация МКЭ и МПС представляет научный интерес, поскольку она помогает в устранении важной проблемы сходимости итерационного процесса в МКЭ благодаря использованию решений МПС как начального приближения. Решения МПС определяют начальные равновесные координаты вантовой сети с требуемым распределением натяжений её элементов. Решения МКЭ определяют окончательную форму комплексной вантово-оболочечной конструкции. Теория МПС также получила широкое применение в расчете НДС конечно-элементных моделей (КЭМ) конструкций сетчатых антенных рефлекторов космических аппаратов. Она позволяет рассчитывать равновесную форму отражающей поверхности рефлектора с высокой точностью и равномерным распределением натяжений её вантовых элементов, что является ключевым фактором в поддержании требуемых радиотехнических характеристик антенны.

Общая характеристика работы. Основной целью диссертации является разработка двухэтапного метода расчета НДС вантово-оболочечных конструкций на основе комбинации МКЭ и МПС.

Диссертационная работа Белова С.В. содержит введение, четыре главы, заключение, список сокращений, список литературы из 87 наименований, двух приложений и изложена на 141 странице машинописного текста, включая 8 таблиц и 82 рисунка. Структура работы логична и последовательна, соответствует цели и задачам исследования. По объему,

структуре и стилю изложения диссертационной работы замечаний не возникает.

Во введении представлена актуальность рассматриваемой темы и степень её разработанности. Сформулированы: цель, решаемые задачи и новизна работы; теоретическая и практическая значимость результатов исследования, а также сведения об их достоверности; положения, выносимые на защиту. Также приведены данные об апробации работы, внедрении и личном участии автора в получении результатов.

В первой главе, по доступным литературным источникам, произведен обзор современных методов поиска (расчета) форм вантовых сетей; сформулированы основные допущения в математической и физической моделях сетей; сделан выбор в пользу нелинейного метода плотности сил как основного метода поиска начальной формы сети; сформулирована задача математического моделирования вантово-оболочечных конструкций на основе геометрически нелинейных уравнений механики деформируемого твердого тела; в качестве численного метода расчета НДС рассматриваемых конструкций выбран МКЭ, где начальные координаты узлов и начальные натяжения вантовых элементов определяются решениями нелинейного МПС.

Во второй главе приведено описание двухэтапного метода расчета НДС вантово-оболочечных конструкций. На первом этапе матричным нелинейным МПС рассчитывается равновесная форма вантовых элементов сети из решения соответствующих уравнений равновесия относительно координат её узлов и нелинейных уравнений, описывающих ограничения на её элементы. Нелинейные уравнения решаются итерационным методом Ньютона, где искомым параметром является вектор-столбец плотности силы. Шаг итерации плотности силы рассчитывается через обратную матрицу произведений матриц Якоби, возникающих при линеаризации нелинейной функции ограничений. В случае плохой обусловленности указанной матрицы предлагается использовать псевдообратную матрицу Мура-Пенроуза.

На втором этапе метода решения МПС используются как начальное

приближение к равновесной форме комплексной КЭМ конструкции, включающей вантовые, балочные и оболочечные элементы. После чего производится расчет НДС с помощью процедуры последовательного изменения граничных условий по перемещениям узлов КЭМ.

В третьей главе предложенный метод расчета применяется к исследованию НДС перспективных сетчатых антенных рефлекторов зонтичного и ободного типов с диаметрами от 12 до 50 метров в пакете конечно-элементного моделирования ANSYS в виде комплекса программ на языке программирования APDL. На первом этапе расчета получены решения МПС, определяющие форму фронтальной (тыльной) сетей рефлекторов с равномерным распределением натяжений. Эти решения были верифицированы решениями МКЭ. На втором этапе найденные координаты узлов и натяжений элементов использовались в расчете НДС комплексных конструкций рефлекторов в МКЭ. Показана эффективность метода при сравнении решений, полученных для зонтичных рефлекторов. Установлено, что решения МПС определяют более эффективную конструкцию рефлектора по точности и времени вычислений по сравнению с той, где МПС не применялся.

В четвертой главе представлены результаты исследования устойчивости и собственных частот 12-метровых рефлекторов зонтичного и ободного типов. Установлено, что использование решений МПС определяет устойчивые конструкции рефлекторов с коэффициентом запаса не меньше 2,3. Первые частоты рефлекторов определяются жесткостью на изгиб их силовых каркасов. Показано, что выбранные конструкции являются оптимальными с точки зрения точности и распределений натяжений их вантовых элементов.

Научная новизна. Новыми результатами, полученными соискателем, следует считать следующие:

– двухэтапный метод расчета НДС вантово-оболочечных конструкций, основанный на комбинации МПС и МКЭ, где решения МПС используются как начальное приближение в нелинейном МКЭ.

– исследование эффективности метода на примерах расчета НДС конструкций сетчатых рефлекторов космических аппаратов с анализом их собственных частот, форм колебаний, а также устойчивости элементов силовых каркасов;

– способ расчета шага итерации плотности силы в нелинейном матричном МПС через псевдообратную матрицу Мура-Пенроуза;

– численные модели перспективных сетчатых рефлекторов зонтичного и ободного типов с вантовыми формообразующими структурами, рассчитанных по МПС.

Практическая значимость полученных результатов заключается в том, что предложенный метод расчета может использоваться в анализе НДС различных вантово-оболочечных конструкций с учетом геометрической нелинейности. Основное практическое применение метод нашел в расчете НДС перспективных рефлекторов, разрабатываемых в АО «Информационные спутниковые системы» имени академика М.Ф. Решетнёва».

Достоверность полученных результатов базируется на использовании фундаментальных положений, законов и теорем механики и подтверждена сравнением результатов расчета, полученных разными методами.

Публикация основных результатов диссертации в научной печати. По теме диссертации соискателем опубликовано 14 работ, в том числе 3 в научных изданиях из списка, включенных в Перечень рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные результаты диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, а также 5 публикаций, входящих в базы данных Scopus и Web of Science.

Замечания по диссертационной работе

1. В третьей главе при расчете НДС конструкций рефлекторов с помощью МКЭ следовало бы более формализовано подходить к изменению граничных условий по перемещениям их узлов, а именно: указать наиболее характерные элементы конструкций, освобождение узлов которых от условий нулевых перемещений может приводить к замедлению или расхождению итерационного процесса Ньютона-Рафсона в МКЭ.

2. Рекомендуется провести исследование НДС рефлекторов, имеющих форму ячеек фронтальной сети отличную от треугольной и сравнить полученные результаты с имеющимися.

3. Рекомендуется провести оценку эффективности предложенного метода (по времени расчета и точности отражающей поверхности) для ободного рефлектора.

4. При поиске формы вантовой сети на первом этапе предложенного метода следовало бы также учитывать влияние деформаций элементов силового каркаса (опорного контура, к которому крепится сеть) на результаты решений уравнений равновесия в МПС.

Заключение. Диссертационная работа Белова Сергея Викторовича является законченной научно-квалификационной работой, в которой предлагается метод расчета НДС вантово-оболочечных конструкций с поиском начальной формы вантовой сети, имеющей существенное значение для развития механики деформируемого твердого тела и, таким образом, соответствует требованиям п. 9 «Положения о присуждении ученых степеней». Результаты проведенной автором научной работы можно считать теоретически обоснованными и представляющими интерес для специалистов в области механики деформируемого твердого тела. Сделанные ведущей организацией замечания связаны с недостаточно подробным изложением некоторых вопросов и в целом не снижают положительного впечатления о проделанной работе.

Выводы в заключительной части работы обоснованы, а текст автореферата соответствует содержанию диссертации. Ведущая организация – ФГБОУ ВО «Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана (национальный исследовательский университет)» – считает, что указанная диссертационная работа отвечает требованиям п. 9 «Положения о присуждении ученых степеней», предъявляемым к кандидатским диссертациям, а её автор Белов Сергей Викторович заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.02.04 – Механика деформируемого твердого тела.

Диссертация, автореферат и отзыв на диссертацию Белова С. В. рассмотрены и одобрены на заседании кафедры космических аппаратов и ракет-носителей МГТУ им. Н.Э. Баумана, протокол № 107 от 25.11.2019 г.

Заместитель заведующего кафедрой
космических аппаратов и ракет-носителей
МГТУ им. Н.Э. Баумана, профессор,

доктор технических наук

«25» 11 2019 г.



Сарбаев Борис Сафиулович

105005, г. Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1

Тел.: +7 (499) 261 01 07

Эл. почта: kafsm1@bmstu.ru

Web сайт: <http://bmstu.ru/>