

Отзыв

официального оппонента о диссертационной работе

Белова Сергея Викторовича

«Метод расчета напряженно-деформированного состояния вантово-оболочечных конструкций с поиском начальной формы вантовой сети», представленной на соискание
ученой степени

кандидата физико-математических наук по специальности

01.02.04 - Механика деформируемого твердого тела

Актуальность работы. Современные тенденции в строительстве и архитектуре связаны с возведением конструкций, которые имеют возможность разворачиваться на большие площади при относительно небольшой массе и оптимальном расходе материала. К такому классу относятся вантово-оболочечные конструкции. Их напряженно-деформированное состояние (НДС) описывается нелинейными уравнениями механики деформируемого твердого тела. В мире наблюдается большой интерес к вопросам развития численных методов решения указанных уравнений. В частности, развивается метод конечных элементов (МКЭ), который используется коллективом научно-исследовательского института прикладной математики и механики Томского государственного университета совместно с АО «Информационные спутниковые системы» имени академика М.Ф. Решетнёва» в расчете НДС вантово-оболочечных конструкций сетчатых антенных рефлекторов космических аппаратов, являющихся важнейшими компонентами современных систем космической связи.

Несмотря на эффективность МКЭ, в нем существует актуальная проблема сходимости итерационного метода Ньютона-Рафсона при решении нелинейных уравнений равновесия относительно перемещений узлов. Однако если построить конечно-элементную модель (КЭМ) рефлектора или любой другой конструкции, в которой начальная форма вантовой сети является равновесной, то сходимость итерационного процесса в МКЭ может быть значительно улучшена. В настоящее время теория поиска равновесных форм сетей стремительно развивается и находит широкие приложения в расчете НДС объектов гражданского строительства и новых конструкций сетчатых рефлекторов. Одним из наиболее востребованных методов поиска является метод плотности сил, который позволяет рассчитывать равновесные координаты узлов вантовых элементов сети. При этом на элементы сети могут быть наложены определенные ограничения по натяжениям и длинам, представленные в виде нелинейной системы уравнений относительно векторного параметра плотности силы. Плотность силы – это постоянная величина, равная отношению натяжения вантового элемента к его длине.

Исходя из вышесказанного, тема диссертации Белова С.В., целью которой является создание метода расчета НДС вантово-оболочечных конструкций на основе комбинации МКЭ и метода плотности сил, является безусловно актуальной.

Анализ содержания диссертационной работы.

Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, списка сокращений, списка литературы, включающего 87 источников, приложений, состоящих из 2 таблиц. Текст работы изложен на 141 странице машинописного текста, включающего 82 рисунка и 8 таблиц.

Во введении приведена информация об актуальности и степени разработанности темы исследования; изложены цель работы, решаемые задачи, научная новизна диссертации, теоретическая и практическая значимость работы, область исследования, используемые методы и методология, положения, выносимые на защиту, сведения о степени достоверности полученных результатов, их апробации и личном участии автора в получении результатов, данные об объеме и структуре работы.

Первая глава посвящена постановке задачи математического моделирования вантово-оболочечных конструкций с поиском начальной формы вантовой сети. Для корректной постановки задачи соискателем был произведен аналитический обзор методов расчета равновесных форм вантовых сетей. Анализировались методы матриц жесткости, плотности сил и динамической релаксации. Показано, что все эти методы являются итерационными, однако их разрешающие уравнения формулируются по-разному. Наиболее подходящим из этих методов для дальнейшего исследования оказался метод плотности сил, так как он позволяет описать ограничения на вантовые элементы системой нелинейных уравнений.

В заключительной части главы сформулирована задача математического моделирования вантово-оболочечных конструкций с поиском начальной формы вантовой сети, основанная на геометрически нелинейных уравнениях механики деформируемого твердого тела. В качестве численного метода их решения использовался МКЭ. При этом начальная равновесная форма сети вантовых элементов рассчитывалась из уравнений метода плотности сил.

Вторая глава посвящена методу расчета НДС вантово-оболочечных конструкций, состоящему из двух этапов. На первом этапе формулируется матричный метод плотности сил, в котором описан способ построения и решения системы линейных алгебраических уравнений (СЛАУ) равновесия, определяющей форму сети. Данная СЛАУ дополнена системой нелинейных уравнений, описывающих ограничения на элементы сети по натяжениям или длинам. Далее описан способ решения нелинейных уравнений итерационным методом Ньютона относительно векторного параметра плотности силы. Шаг итерации плотности силы рассчитывался через обратную матрицу произведений матриц Якоби, возникающих в результате разложения в ряд Тейлора нелинейной функции ограничений. На примере расчета вантовой формообразующей структуры зонтичного рефлектора показано, что значение определителя указанной обратной матрицы может быть близко к нулю (случай плохо обусловленной матрицы), что вызывает трудности в расчете шага итерации. Поэтому было предложено шаг итерации рассчитывать через псевдообратную матрицу Мура-Пенроуза, которая не зависит от числа обусловленности и является обобщением обратной матрицы.

На втором этапе метода предлагается процедура расчета НДС вантово-оболочечных конструкций на основе МКЭ, в которой решения первого этапа использовались для построения КЭМ равновесной вантовой сети. Процедура построена на последовательности решений, получаемых изменением граничных условий по перемещениям узлов КЭМ исследуемой конструкции. Предложенный метод реализован в программном комплексе конечно-элементного моделирования ANSYS с помощью языка программирования APDL.

Третья глава посвящена приложению метода расчета НДС к конструкциям сетчатых антенных рефлекторов. В главе дана краткая информация о рефлекторах и характерной проблематике в их проектировании. Сделаны основные допущения при построении КЭМ. Приведены некоторые примеры расчета НДС рефлекторов с диаметрами до 50м. Однако основной целью главы было исследование НДС 12-метровых конструкций зонтичного и ободного типов. В исследовании определены координаты узлов и значения натяжений вантовых элементов формообразующих структур рефлекторов методом плотности сил. Показано, что решения метода плотности сил являются верными. Далее описаны результаты расчета НДС рефлекторов, полученные с помощью МКЭ. Их можно считать наиболее значимыми, так как в них дана оценка величины среднеквадратического (СКО) отклонения узлов отражающей поверхности рефлекторов от поверхности офсетного параболоида. СКО является одним из важнейших параметров, определяющим радиотехнические характеристики антенны. Установлено, что использование решений метода плотности сил в МКЭ определило более эффективную конструкцию по величине СКО и времени расчета по сравнению с конструкцией, где метод плотности сил не применялся.

Четвертая глава посвящена анализу собственных частот, форм колебаний 12-метровых рефлекторов. Также исследована устойчивость элементов их силовых каркасов. Для зонтичного рефлектора установлено, что значения первых частот и соответствующие формы колебаний определяются жесткостью спиц силового каркаса на изгиб. Минимальный коэффициент запаса устойчивости спиц составил величину 2,3. В исследовании ободного рефлектора, показано, что на его собственные частоты и формы колебаний влияет толщина обода силового каркаса. Минимальные коэффициенты запаса устойчивости элементов обода и стойки составили величины 17,4 и 14,7 соответственно. Такие высокие значения объясняются относительно небольшой длиной исследуемых элементов.

В заключении приведены основные результаты, выводы диссертационной работы, а также перспективы дальнейшей разработки темы.

В приложениях приведены таблицы с координатами узлов, рассчитанных по методу плотности сил для фронтальных сетей зонтичного и ободного рефлекторов.

Достоверность и новизна научных положений, выводов и практических рекомендаций.

Достоверность научных положений основана на использовании математически обоснованного аппарата в нелинейной механике деформируемого твердого тела, теории метода конечных элементов, вычислительной линейной алгебры. Выводы подкреплены

верификацией решений метода плотности сил с помощью решений МКЭ. Практические рекомендации для расчета равновесных форм вантовых сетей опираются на доказанные положения теории вычислительной линейной алгебры и метода плотности сил.

Научная новизна полученных результатов:

- построен метод расчета НДС вантово-оболочечных конструкций, основанный на методах конечных элементов и плотности сил. При этом в методе конечных элементов использована оригинальная процедура построения последовательности решений, получаемых за счет изменения граничных условий по перемещениям узлов КЭМ исследуемой конструкции. Первое решение этой последовательности находится с помощью метода плотности сил;

- предложен способ расчета шага итерации плотности силы с помощью псевдообратной матрицы Мура-Пенроуза в решении нелинейной системы уравнений, описывающей ограничения на вантовые элементы;

- построены численные модели и проведено исследование НДС перспективных сетчатых рефлекторов на основе предложенного метода. Дана оценка эффективности метода при анализе времени расчета и полученной точности конструкции зонтичного рефлектора;

- проведен анализ собственных частот и форм колебаний и устойчивости 12-метровых рефлекторов зонтичного и ободного типов, в котором установлено, что элементы исследуемых конструкций устойчивы, а собственные частоты и соответствующие формы колебаний зависят от жесткости силовых каркасов рефлекторов.

Степень обоснованности научных положений, выводов и рекомендаций, сформулированных в диссертации.

Сформулированные в диссертации научные положения, выводы и рекомендации являются в достаточной мере обоснованными. Предложенный метод расчета основан на решении геометрически нелинейных уравнений теории упругости многократно верифицированным МКЭ. Кроме того, полученные решения метода плотности сил для вантовых формообразующих структур сетчатых рефлекторов были верифицированы решениями МКЭ; в исследовании устойчивости элементов силовых каркасов рефлекторов, полученные значения критических сил согласуются с теорией линейного и нелинейного анализа на устойчивость; рекомендация использовать решения метода плотности сил в МКЭ подкреплена соответствующими результатами расчетов, показывающих эффективность комбинации этих методов.

Рекомендации по использованию результатов и выводов диссертации.

Предложенный метод может быть рекомендован для численного анализа НДС вантово-оболочечных конструкций с помощью МКЭ, в котором существует проблема сходимости итерационного процесса Ньютона-Рафсона к требуемому решению.

Значимость для науки и практики полученных автором результатов.

Значимость для науки полученных результатов заключается в том, что предложенный метод расчета расширяет возможности численного анализа вантово-оболочечных конструкций с позиций нелинейной теории упругости. Практическое

значение результатов заключается в возможности построения оптимизированных численных моделей сетчатых рефлекторов, разрабатываемых в АО «Информационные спутниковые системы» имени академика М.Ф. Решетнёва» и НИИ ПММ ТГУ.

Замечания по содержанию и оформлению диссертации

1. При расчете вантовых формообразующих структур сетчатых рефлекторов следовало бы использовать смешанные ограничения на вантовые элементы. Например, по длинам и натяжениям, а не только по натяжениям. Такой подход не только расширит возможности предлагаемого метода, а также даст более глубокое понимание о рамках его применимости.
2. В формуле (2.20) на стр. 43 необходимо сделать предположение о существовании обратной матрицы $(\mathbf{G}^T \mathbf{G})^{-1}$. В пояснении к этой формуле следует писать, что она является минимальным решением по евклидовой норме уравнений (2.19), а не просто решением.
3. Для большей наглядности, на стр. 81-82 описание геометрических параметров и механических характеристик 12-метровых рефлекторов следует делать таблицей. В формулах расчета модуля упругости $E_{ш}=K_{ш}/S_{ш}$ вантовых элементов (шнуров) не указана размерность числителя (жесткости на растяжение) в Н.
4. В приложениях стоит добавить таблицу значений натяжений (рассчитанных по методу плотности) вантовых элементов формообразующих структур 12-метровых рефлекторов. Эти данные помогут относительно быстро построить указанные структуры в любом пакете конечно-элементного моделирования, не прибегая к программированию всего алгоритма предложенного метода расчета.

Заключение о соответствии диссертации критериям, установленным

Положением о порядке присуждения ученых степеней

Представленная диссертация Белова С.В. выполнена на достаточно высоком квалификационном уровне и соответствует паспорту специальности ВАК 01.02.04 по пунктам 7 и 8 раздела «Области исследований»: 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; 8. Математические модели и численные методы анализа применительно к задачам, не допускающим прямого аналитического исследования. Сделанные замечания не снижают научной ценности диссертации. Оформление диссертации в целом отвечает требованиям, установленным ВАК Министерства образования и науки Российской Федерации. Содержание автореферата соответствует содержанию диссертации.

По теме диссертации Беловым С.В. опубликовано 14 работ, в том числе 3 статьи из Перечня рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные результаты диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание ученой степени доктора наук. В представленном списке имеется 5 публикаций, входящих в базы данных Scopus и Web of Science.

Диссертация «Метод расчета напряженно-деформированного состояния вантово-оболочечных конструкций с поиском начальной формы вантовой сети» является законченной научно-квалификационной работой. По содержанию, научной новизне, объему проведенных исследований, теоретической и практической значимости результатов она полностью соответствует п.9 «Положения о присуждении ученых степеней», утвержденного Постановлением Правительства РФ от 24.09.2013г. № 842 (в ред. от 01.10.2018), предъявляемым к кандидатским диссертациям, а ее автор, Белов Сергей Викторович, заслуживает присуждения ему ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.02.04 - Механика деформируемого твердого тела.

Официальный оппонент:

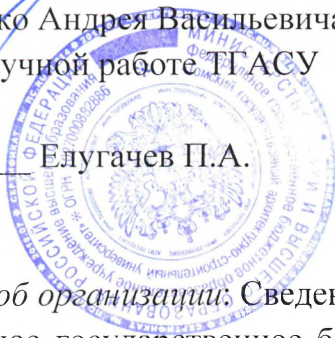
директор Института кадастра, экономики и инженерных систем в строительстве федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Томский государственный архитектурно-строительный университет», доктор физико-математических наук (01.02.04 - Механика деформируемого твердого тела), профессор

Радченко Андрей Васильевич

02.12.2019 г.

Подпись Радченко Андрея Васильевича удостоверяю
Проректор по научной работе ТГАСУ

Елугачев П.А.



Сведения об организации: Сведения об организации:

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Томский государственный архитектурно-строительный университет»; 634003, г. Томск, пл. Соляная, 2; (3822) 47-28-91; rector@tsuab.ru; сайт организации: <http://www.tsuab.ru>