

СВЕДЕНИЯ О РЕЗУЛЬТАТАХ ПУБЛИЧНОЙ ЗАЩИТЫ ДИССЕРТАЦИИ

Диссертационный совет Д 212.267.13, созданный на базе федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Национальный исследовательский Томский государственный университет», извещает о результатах состоявшейся 27 декабря 2019 года публичной защиты диссертации Белова Сергея Викторовича «Метод расчета напряженно-деформированного состояния вантово-оболочечных конструкций с поиском начальной формы вантовой сети» по специальности 01.02.04 – Механика деформируемого твёрдого тела на соискание учёной степени кандидата физико-математических наук.

Присутствовали 20 из 26 членов диссертационного совета, из них 6 докторов наук по специальности 01.02.04 – Механика деформируемого твёрдого тела:

- | | |
|--|----------|
| 1. Шрагер Г. Р., доктор физико-математических наук, профессор,
председатель диссертационного совета, | 01.02.05 |
| 2. Христенко Ю. Ф., доктор технических наук, старший научный сотрудник,
заместитель председателя диссертационного совета, | 01.02.04 |
| 3. Пикущак Е. В., кандидат физико-математических наук,
учёный секретарь диссертационного совета, | 01.02.05 |
| 4. Архипов В. А., доктор физико-математических наук, профессор, | 01.02.05 |
| 5. Биматов В. И., доктор физико-математических наук, доцент, | 01.02.05 |
| 6. Бубенчиков А. М., доктор физико-математических наук, профессор, | 01.04.14 |
| 7. Бутов В. Г., доктор физико-математических наук, профессор, | 01.04.14 |
| 8. Глазунов А. А., доктор физико-математических наук,
старший научный сотрудник, | 01.02.05 |
| 9. Зелепугин С. А., доктор физико-математических наук,
старший научный сотрудник, | 01.02.04 |
| 10. Крайнов А. Ю., доктор физико-математических наук, профессор, | 01.04.14 |
| 11. Лапшин О. В., доктор физико-математических наук, | 01.04.14 |
| 12. Люкшин Б. А., доктор технических наук, профессор, | 01.02.04 |
| 13. Макаров П. В., доктор физико-математических наук, | 01.02.04 |
| 14. Миньков Л. Л., доктор физико-математических наук, профессор, | 01.04.14 |
| 15. Пономарев С. В., доктор физико-математических наук,
старший научный сотрудник, | 01.02.04 |
| 16. Прокофьев В. Г., доктор физико-математических наук, | 01.04.14 |
| 17. Скрипняк В. А., доктор физико-математических наук, профессор, | 01.02.04 |
| 18. Старченко А. В., доктор физико-математических наук, профессор, | 01.04.14 |
| 19. Тимченко С. В., доктор физико-математических наук,
старший научный сотрудник, | 01.02.05 |
| 20. Шрагер Э. Р., доктор физико-математических наук, доцент, | 01.04.14 |

Заседание провёл председатель диссертационного совета доктор физико-математических наук, профессор Шрагер Геннадий Рафаилович.

По результатам защиты диссертации тайным голосованием (результаты голосования: за присуждение учёной степени – 20, против – нет, недействительных бюллетеней – нет) диссертационный совет принял решение присудить С. В. Белову учёную степень кандидата физико-математических наук.

**Заключение диссертационного совета Д 212.267.13,
созданного на базе федерального государственного автономного
образовательного учреждения высшего образования
«Национальный исследовательский Томский государственный университет»
Министерства науки и высшего образования Российской Федерации,
по диссертации на соискание ученой степени кандидата наук
аттестационное дело № _____**

решение диссертационного совета от 27.12.2019 № 408

О присуждении **Белову Сергею Викторовичу**, гражданину Российской Федерации, ученой степени кандидата физико-математических наук.

Диссертация **«Метод расчета напряженно-деформированного состояния вантово-оболочечных конструкций с поиском начальной формы вантовой сети»** по специальности **01.02.04** – Механика деформируемого твердого тела принята к защите 23.10.2019 (протокол заседания № 394) диссертационным советом **Д 212.267.13**, созданным на базе федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Национальный исследовательский Томский государственный университет» Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (634050, г. Томск, пр. Ленина, 36, приказ о создании диссертационного совета № 105/нк от 11.04.2012).

Соискатель **Белов Сергей Викторович**, 1983 года рождения.

В 2019 соискатель очно окончил федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский Томский государственный университет» с выдачей диплома об окончании аспирантуры.

Работает в должности младшего научного сотрудника лаборатории 23 Научно-исследовательского института прикладной математики и механики в федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Национальный исследовательский Томский государственный университет» Министерства науки и высшего образования Российской Федерации.

Диссертация выполнена в лаборатории 23 Научно-исследовательского института прикладной математики и механики федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Национальный

исследовательский Томский государственный университет» Министерства науки и высшего образования Российской Федерации.

Научный руководитель – доктор физико-математических наук, **Пономарев Сергей Васильевич**, федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский Томский государственный университет», лаборатория 23 Научно-исследовательского института прикладной математики и механики, ведущий научный сотрудник.

Официальные оппоненты:

Радченко Андрей Васильевич, доктор физико-математических наук, профессор, федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Томский государственный архитектурно-строительный университет», Институт кадастра, экономики и инженерных систем строительстве, директор

Каледин Валерий Олегович, доктор технических наук, профессор, федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Кемеровский государственный университет», научно-исследовательская лаборатория математического моделирования Новокузнецкого института (филиала), заведующий лабораторией

дали положительные отзывы на диссертацию.

Ведущая организация – федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «**Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана (национальный исследовательский университет)**», г. Москва, в своем положительном отзыве, подписанным **Сарбаевым Борисом Сафиуловичем** (доктор технических наук, профессор, кафедра космических аппаратов и ракет-носителей, заместитель заведующего кафедрой), указала, что создание и развитие адекватных моделей расчета напряженно-деформированного состояния реальных конструкций является актуальной задачей. Кроме того, в расчетной модели важно учитывать свойство геометрической нелинейности. В настоящее время широко используются численные методы, основанные на комбинации методов конечных элементов и плотности сил. Комбинация методов конечных элементов и методов плотности сил представляет научный интерес, поскольку она помогает в устранении важной проблемы

сходимости итерационного процесса в методе конечных элементов, благодаря использованию решений метода плотности сил как начального приближения. С. В. Беловым предложен двухэтапный метод расчета НДС вантово-оболочечных конструкций, основанный на комбинации метода плотности сил и метода конечных элементов, где решения МПС используются как начальное приближение в нелинейном методе конечных элементов; проведено исследование эффективности метода на примерах расчета напряженно-деформированного состояния конструкций сетчатых рефлекторов космических аппаратов с анализом их собственных частот, форм колебаний, а также устойчивости элементов силовых каркасов; предложен способ расчета шага итерации плотности силы в нелинейном матричном методе плотности сил через псевдообратную матрицу Мура–Пенроуза; получены численные модели перспективных сетчатых рефлекторов зонтичного и ободного типов с вантовыми формообразующими структурами, рассчитанных по методу плотности сил. Предложенный метод расчета может использоваться в анализе НДС различных вантово-оболочечных конструкций с учетом геометрической нелинейности.

Соискатель имеет 14 опубликованных работ, в том числе по теме диссертации опубликовано 14 работ, из них в рецензируемых научных изданиях опубликовано 3 работы, в сборниках материалов конференций, представленных в зарубежных научных изданиях, входящих в Web of Science и Scopus, опубликовано 5 работ, в сборниках материалов международных и всероссийских научных конференций опубликовано 6 работ. Общий объем публикаций – 3,74 а.л., авторский вклад – 1,04 а.л.

В диссертации отсутствуют недостоверные сведения об опубликованных соискателем ученой степени работах, в которых изложены основные научные результаты диссертации.

Наиболее значительные работы по теме диссертации, опубликованные в журналах, включенных в Перечень рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание ученой степени доктора наук:

1. Белов С. В. Численное моделирование трансформируемых космических рефлекторных антенн / С. В. Белов, А. В. Бельков, А. С. Евдокимов, А. П. Жуков,

М. С. Павлов, С. В. Пономарев, В. С. Пономарев, В. А. Солоненко, А. А. Ящук // Известия высших учебных заведений. Физика. – 2012. – № 9/3. – С. 13–18. – 0,31 / 0,08 а.л.

2. Величко А. И. Космический рефлектор с тензогридным ободом / А. И. Величко, **С. В. Белов**, С. В. Пономарев // Известия высших учебных заведений. Физика. – 2013. – № 7/3. – С. 143–145. – 0,13 / 0,04 а.л.

3. Белов С. В. Оценка напряженно-деформированного состояния силового каркаса крупногабаритного раскрываемого космического рефлектора / **С. В. Белов**, А. В. Бельков, А. П. Жуков, М. С. Павлов, В. С. Пономарев, С. В. Пономарев, А. И. Величко, В. И. Халиманович // Известия высших учебных заведений. Физика. – 2013. – № 7/3. – С. 131–133. – 0,19 / 0,04 а.л.

Статьи в сборниках материалов конференций, представленных в зарубежных научных изданиях, входящих в Web of Science и Scopus:

4. Belov S. Calculation method for cable-beam shell structures / **S. Belov**, M. Pavlov, V. Ponomarev, S. Ponomarev, A. Zhukov // AIP Conference Proceedings. – 2016. – Vol. 1772 : Prospects of Fundamental Sciences Development (PFSD–2016): Proceedings of the XIII International Conference of Students and Young Scientists. Tomsk, Russia, April 26–29, 2016. – Article number 060066. – 8 p. – DOI: 10.1063/1.4964586. – URL: <https://aip.scitation.org/doi/pdf/10.1063/1.4964586?class=pdf> (access date: 08.10.2019). – 0,39 / 0,08 а.л. (*Web of Science*)

На автореферат поступило 6 положительных отзывов. Отзывы представили: 1. **Д. Б. Усманов**, канд. физ.-мат. наук, главный специалист по математическому обеспечению Отраслевого центра крупногабаритных трансформируемых механических систем АО «Информационные спутниковые системы» имени академика М.Ф. Решетнёва», г. Железногорск, *с замечаниями*: недостаточно подробно обоснован выбор типов и размеров конечных элементов в моделях КТР КА, в состав которых входят такие разнородные элементы, такие как нити, мембраны, жесткие спицы и т.п.; в автореферате отмечено, что для задания натяжения шнуров вантовой сети КТР используются поля температур, хотя, обладая глубокими познаниями в численных методах решения нелинейных задач МДТТ и APDL ANSYS, автор мог

бы задавать непосредственно эти значения натяжений (напряжений) в элементах ФОС для различных лагранжевых конфигураций многосвязной области КТР; из автореферата неясно, рекомендуется ли на практике контролировать результирующие натяжения элементов ФОС при проведении монтажных операций и зачетных наземных испытаний в соответствии с выбранным подходом МПС; в автореферате не отмечено влияние натяжения сетчатой ОП КТР на кривизну элементов ФОС и, следовательно, на значения плотности сил в вантах.

2. **В. Н. Барашков**, д-р физ.-мат. наук, ст. науч. сотр., профессор кафедры строительной механики Томского государственного архитектурно-строительного университета, *с замечаниями*: из автореферата неясно, как влияет температура на деформации элементов рефлектора – вант, опорного контура и сетеполотна при работе на орбите и каков вклад температурных деформаций в среднеквадратическое отклонение отражающей поверхности; отсутствует информация о базисных функциях, используемых при решении дифференциальных уравнения равновесия теории упругости методом Бубнова-Галёркина; присутствуют неточности оформительского плана. 3. **М. А. Дмитриева**, д-р физ.-мат. наук, доц., заведующий кафедрой градостроительства, землеустройства и дизайна Балтийского федерального университета имени Иммануила Канта, г. Калининград, *с замечанием*: нелинейные уравнения равновесия в формуле (9) на стр. 9 следовало бы писать через параметр плотности силы. Такое представление явно показывает, что нелинейные уравнения преобразуются в линейные относительно координат узлов вантовой сети. 4. **В. Н. Лейцин**, д-р физ.-мат. наук, проф., заведующий лабораторией фундаментального и прикладного материаловедения Балтийского федерального университета имени Иммануила Канта, г. Калининград, *с замечаниями*: на рисунке 2 стр. 12 наблюдается несогласованность в обозначении транспонирования произведения матриц: под графиком собственных значений используется обозначение $\mathbf{G}\mathbf{G}^T$, а в пояснении рисунка написано $\mathbf{G}^T\mathbf{G}$; на стр. 13 в пояснении к формуле (24) следует писать « S_j – площадь поперечного сечения вантового элемента», а не « S_j – площадь вантового элемента». 5. **А. В. Лопатин**, д-р техн. наук, проф., заведующий кафедрой компьютерного моделирования Сибирского государственного университета

науки и технологий имени академика М.Ф. Решетнева, г. Красноярск, *с замечанием:* на правом рисунке 11 (стр. 17) опечатка в размерности значений среднеквадратического (СКО) отклонения узлов отражающей поверхности от офсетного параболоида: размерность должна быть в метрах. 6. **О. П. Клишев**, д-р техн. наук, начальник отдела «Математического и имитационного моделирования с использованием суперкомпьютеров» АО «Центральный научно-исследовательский институт машиностроения», г. Королев, Московская область, *с замечаниями:* не рассмотрено изменение геометрических характеристик рефлектора (положение фокуса), обусловленных упругими деформациями его конструкции; при расчете динамических характеристик рефлектора не учитывались нелинейные жесткостные и диссипативные свойства узлов раскрытия; значения СКО отражающей поверхности, приведенные на рисунке 12, слишком большие для такого класса конструкций.

В отзывах отмечается, что актуальность темы исследования связана с возрастающим количеством научно-технических разработок в области крупногабаритных трансформируемых рефлекторов космических аппаратов за рубежом и необходимостью создания отечественных крупногабаритных трансформируемых рефлекторов многолучевых антенн. Наиболее широкое распространение получили концепции рефлекторов с сетчатой отражающей поверхностью, использующих вантовую формообразующую систему. С. В. Беловым описан новый двухэтапный метод расчета, в котором нелинейные уравнения механики деформируемого твердого тела решаются методами конечных элементов и плотности сил; получены оптимальные по точности отражающей поверхности и времени расчета конструкции рефлекторов; показано, что, элементы силовых каркасов рефлекторов устойчивы к воздействию натяжений шнуров формообразующей структуры. Результаты исследования представляют несомненную теоретическую и практическую ценность. Такого рода вантовые сети нашли широкое применение для сооружений облегченных строительных конструкций, при проектировании которых широко используется метод плотности сил, в котором наиболее полно формализовано определение ограничений на вантовые элементы в виде нелинейной системы уравнений в зависимости от параметра плотности силы (натяжения вантового элемента к его длине).

Выбор официальных оппонентов и ведущей организации обосновывается тем, что **А. В. Радченко** является известным специалистом в области механики материалов со сложными физико-механическими свойствами при высокоэнергетических воздействиях, **В. О. Каледин** является известным специалистом в области численных методов решения краевых задач и расчета на прочность, численных методов в динамике и прочности конструкций, численных методов в задачах разведочной геофизики, **Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана (национальный исследовательский университет)** известен достижениями в области механики деформируемого твердого тела, а также в исследованиях напряженно-деформированного состояния вантово-оболочечных конструкций сетчатых антенных рефлекторов космических аппаратов.

Диссертационный совет отмечает, что на основании выполненных соискателем исследований:

разработан двухэтапный метод решения краевых задач определения напряженно-деформированного состояния вантово-оболочечных конструкций, основанный на комбинации методов плотности сил и конечных элементов;

предложено на первом этапе метода при поиске формы вантовой сети использовать псевдообратную матрицу Мура-Пенроуза для устранения влияния плохой обусловленности в расчете векторных шагов итераций плотностей сил;

предложено использовать решения метода плотности сил для построения численных моделей рефлекторов, так как эти решения определяют форму исследуемых конструкций, приближенную к равновесной, что важно для последующего определения напряженно-деформированного состояния методом конечных элементов;

установлено, что предложенный метод успешно апробирован на численных моделях перспективных антенных рефлекторов космических аппаратов с диаметрами от 12 до 50 метров. Для 12-метровых рефлекторов построены численные модели вантовых формообразующих структур методом плотности сил, которые верифицированы решениями метода конечных элементов;

установлено при проведении анализа напряженно-деформированного состояния рефлекторов методом конечных элементов, что решения метода плотности сил определили более эффективную конструкцию зонтичного рефлектора по точности и времени расчета по сравнению с той, в которой решения метода плотности сил не использовались.

показана устойчивость элементов силовых каркасов к воздействию натяжений шнуров вантовой формообразующей структуры;

установлено, что на первые три собственные частоты и формы колебаний рефлекторов влияет жесткость элементов силовых каркасов на изгиб.

Теоретическая значимость исследования обоснована тем, что:

разработан метод расчета, позволяющий численно решать геометрически нелинейные задачи методом конечных элементов, в котором граничные условия по напряжениям и начальные равновесные координаты вантовых элементов рассчитываются методом плотности сил. Такой подход помогает в устранении проблемы расходимости итерационного процесса в методе Ньютона-Рафсона, используемого для решения нелинейных уравнений равновесия.

Значение полученных соискателем результатов исследований для практики подтверждается тем, что:

разработан и внедрен в «АО «Информационные спутниковые системы» имени академика М.Ф. Решетнёва» метод исследования напряженно-деформированного состояния перспективных вантово-оболочечных конструкций сетчатых антенных рефлекторов космических аппаратов.

Рекомендации об использовании результатов диссертационного исследования. Разработанный автором метод расчета может найти применение в учебном процессе вузов и в научных исследованиях, направленных на развитие теории механики деформируемого твердого тела, в частности в анализе таких конструкций, как тенты, вантово-оболочечные крыши зданий, сетчатые антенные рефлекторы космических аппаратов, в том числе в следующих организациях: Московский государственный технический университет имени Н. Э. Баумана (национальный исследовательский университет), Томский государственный

архитектурно-строительный университет, АО «Информационные спутниковые системы» имени академика М.Ф. Решетнёва» (г. Железногорск, Красноярский край); АО «Центральный научно-исследовательский институт специального машиностроения» (г. Хотьково, Московская область), а также в проектных и научно-исследовательских организациях, таких как: ООО «Проектный строительный институт «Промгражданпроект» (г. Рязань), ОАО «Сибгипротранс» (г. Новосибирск) и др.

Оценка достоверности результатов исследования выявила:

использована адекватная математическая модель напряженно-деформированного состояния конструкций, учитывающая геометрическую нелинейность;

показана достоверность решений метода плотности сил независимыми решениями метода конечных элементов при расчете вантовых формообразующих структур сетчатых антенных рефлекторов;

показана сходимость решений метода плотности сил к требуемым значениям при увеличении количества итераций;

установлено, что значения критических сил потери устойчивости, полученных в линейном анализе для элементов силовых каркасов рефлекторов, были выше соответствующих значений критических сил, полученных в нелинейном анализе. Этот результат согласуется теорией линейного и нелинейного анализа на устойчивость в методе конечных элементов.

Научная новизна результатов диссертационного исследования заключается в том, что предложен метод расчета напряженно-деформированного состояния вантово-оболочечных конструкций, основанный на комбинации методов конечных элементов и плотности сил; в методе плотности сил оптимизирован шаг итерации плотности силы с помощью псевдообратной матрицы Мура-Пенроуза при решении нелинейных уравнений, описывающих ограничения на вантовые элементы сети; на основе предложенного метода произведено исследование напряженно-деформированного состояния перспективных сетчатых антенных рефлекторов с диаметрами от 12 до 50 метров, в котором установлена эффективность метода по времени расчета и точности отражающей поверхности рефлекторов;

произведен анализ собственных частот форм колебаний и устойчивости рефлекторов, в котором показано, что предложенные конструкции являются устойчивыми, а их собственная частота зависит от жесткости силовых каркасов на изгиб.

Личный вклад соискателя состоит в: разработке вычислительных программ предложенного метода на языке APDL программного комплекса ANSYS для конструкций сетчатых антенных рефлекторов, выборе метода плотности сил для поиска равновесных формы вантовых сетей исследуемых конструкций, обработке и анализе полученных результатов расчета напряженно-деформированного состояния рефлекторов, подготовке статей и докладов, выступлении на конференциях.

Диссертация отвечает критериям, установленным Положением о присуждении ученых степеней для диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, и, в соответствии с пунктом 9 Положения, является научно-квалификационной работой, в которой содержится решение научной задачи расчета напряженно-деформированного состояния вантово-оболочечных конструкций с поиском начальной равновесной формы вантовой сети, имеющей значения для развития механики деформируемого твердого тела.

На заседании 27.12.2019 диссертационный совет принял решение присудить **Белову С. В.** ученую степень кандидата физико-математических наук.

При проведении тайного голосования диссертационный совет в количестве 20 человек, из них 6 докторов наук по специальности 01.02.04 – Механика деформируемого твердого тела, участвовавших в заседании, из 26 человек, входящих в состав совета, проголосовал: за – 20, против – нет, недействительных бюллетеней – нет.

Председатель
диссертационного совета

Ученый секретарь
диссертационного совета

27.12.2019



Шрагер Геннадий Рафаилович

Пикушак Елизавета Владимировна