

## 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 02 июля 2020 года публичной защиты диссертации Кузнецова Станислава Александровича «Напряженно-деформированное состояние активных вантовых элементов с пьезоприводами системы регулирования формы отражающей поверхности космических рефлекторов» по специальности 01.02.04 – Механика деформируемого твердого тела на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук.

Присутствовали 19 из 26 членов диссертационного совета, из них 7 докторов наук по специальности 01.02.04 – Механика деформируемого твердого тела:

- |  |          |
|--|----------|
| 1. Шрагер Г. Р., доктор физико-математических наук, профессор,<br>председатель диссертационного совета,                      | 01.02.05 |
| 2. Христенко Ю. Ф., доктор технических наук, старший научный сотрудник,<br>заместитель председателя диссертационного совета, | 01.02.04 |
| 3. Пикущак Е. В., кандидат физико-математических наук,<br>ученый 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. Глазунов А. А., доктор физико-математических наук, профессор,   | 01.02.05 |
| 8. Глазырин В. П., доктор физико-математических наук,<br>старший научный сотрудник,  | 01.02.04 |
| 9. Зелепугин С. А., доктор физико-математических наук,<br>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, профессор,   | 01.02.04 |
| 14. Миньков Л. Л., доктор физико-математических наук, профессор,   | 01.04.14 |
| 15. Пономарев С. В., доктор физико-математических наук,<br>старший научный сотрудник,  | 01.02.04 |
| 16. Прокофьев В. Г., доктор физико-математических наук, доцент,  | 01.04.14 |
| 17. Скрипняк В. А., доктор физико-математических наук, профессор,  | 01.02.04 |
| 18. Тимченко С. В., доктор физико-математических наук,<br>старший научный сотрудник,   | 01.02.05 |
| 19. Шрагер Э. Р., доктор физико-математических наук, доцент,   | 01.04.14 |

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

По результатам защиты диссертации тайным голосованием (результаты голосования: за присуждение ученой степени – 19, против – нет, недействительных бюллетеней – нет) диссертационный совет принял решение присудить С. А. Кузнецову ученую 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 02.07.2020 № 435

О присуждении **Кузнецову Станиславу Александровичу**, гражданину Российской Федерации, ученой степени кандидата физико-математических наук.

Диссертация **«Напряженно-деформированное состояние активных вантовых элементов с пьезоприводами системы регулирования формы отражающей поверхности космических рефлекторов»** по специальности **01.02.04** – Механика деформируемого твердого тела принята к защите 19.02.2020 (протокол заседания № 418) 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 **Кузнецов Станислав Александрович**, 1984 года рождения.

В 2007 году соискатель окончил федеральное государственное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Сибирский федеральный университет».

С 14 июня 2019 г. соискатель прикреплен к федеральному государственному автономному образовательному учреждению высшего образования «Национальный исследовательский Томский государственный университет» для подготовки диссертации на соискание ученой степени кандидата наук.

Работает в должности ведущего специалиста отдела 740 в Акционерном обществе «Информационные спутниковые системы» имени академика М.Ф. Решетнёва», по совместительству – в должности инженера 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», отдел 20 Научно-исследовательского института прикладной математики и механики, заведующий отделом.

Официальные оппоненты:

**Радченко Андрей Васильевич**, доктор физико-математических наук, профессор, федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Балтийский государственный технический университет «ВОЕНМЕХ» им. Д.Ф. Устинова», кафедра Е7 «Механика деформируемого твердого тела», профессор

**Уцын Григорий Евгеньевич**, кандидат физико-математических наук, доцент, федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники», кафедра механики и графики, доцент

дали положительные отзывы на диссертацию.

Ведущая организация – федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «**Балтийский федеральный университет имени Иммануила Канта**», г. Калининград, в своем положительном отзыве, подписанном **Великановым Николаем Леонидовичем** (доктор технических наук, профессор, кафедра машиноведения и технических систем, заведующий кафедрой), указала, что устройства регулирования формы отражающей поверхности крупногабаритных трансформируемых антенных рефлекторов – весьма актуальный и востребованный механизм для обеспечения передачи сигналов высокой частоты.

Необходимость обеспечения настройки отражающей поверхности крупногабаритных трансформируемых антенных рефлекторов с вантовой формообразующей системой необходима в связи с ухудшением физико-механических характеристик вантовых элементов формообразующей системы в течение срока существования космического аппарата, что приводит к искажению отражающей поверхности. С. А. Кузнецовым сформулирована новая математическая постановка задачи для определения напряженно-деформированного состояния крупногабаритного трансформируемого антенного рефлектора с вантовой конструкцией, имеющей систему активного регулирования формы отражающей поверхности с пьезоприводами; разработана модель активных вантовых элементов с пьезоприводами системы регулирования формы отражающей поверхности крупногабаритных трансформируемых антенных рефлекторов космических аппаратов, учитывающая комплекс нелинейностей различного рода; предложен алгоритм численного решения нелинейной задачи механического поведения активных вантовых элементов прецизионной системы регулирования формы отражающей поверхности крупногабаритных трансформируемых антенных рефлекторов с пьезоприводами; разработана инженерная (одномерная) модель, учитывающая свойства пьезопакета и всей колебательной системы, позволяющая определять зону устойчивой и неустойчивой работы пьезопривода; разработаны подход и представлены экспериментальные данные процесса регулирования длин вантовых элементов пьезоприводами на специально созданном стенде, учитывающем нелинейность жесткостей тыльной и фронтальной вантовых сетей рефлектора. Предложенный комплекс методов и подходов является теоретической основой для проектирования крупногабаритных трансформируемых антенных рефлекторов с системой активного регулирования на основе пьезоприводов и служит обоснованием метода управления точностью отражающей поверхности рефлектора на орбите. Полученные результаты вносят вклад в развитие механики деформируемого твердого тела в части определения напряженно-деформированного состояния системы регулирования длин вант и ее элементов.

Соискатель имеет 17 опубликованных работ, в том числе по теме диссертации опубликовано 17 работ, из них в рецензируемых научных изданиях опубликовано 3 работы (из них в российском научном журнале, входящем в Web of Science,

опубликована 1 работа); в сборнике материалов конференции, представленном в издании, входящем в Web of Science, опубликована 1 работа; в сборнике материалов конференций, представленных в изданиях, входящих в Scopus, опубликовано 3 работы; в сборниках материалов международных и всероссийской научных и научно-практических конференций опубликовано 10 работ. Общий объем публикаций – 5,29 а.л., авторский вклад – 1,55 а.л.

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

Наиболее значимые 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. Азин А. В. Моделирование контактного взаимодействия элементов пьезоэлектрического двигателя / А. В. Азин, **С. А. Кузнецов**, С. А. Пономарев, С. В. Пономарев, С. В. Рикконен // Космические аппараты и технологии. – 2019. – Т. 3, № 4 (30). – С. 222–229. – DOI 10.26732/2618-7957-2019-4-222-229. – 0.73 / 0.14 а.л.

2. Азин А. В. Математическое моделирование процесса работы пьезодвигателя типа «Захват» / А. В. Азин, **С. А. Кузнецов**, С. А. Пономарев, С. В. Пономарев, С. В. Рикконен // Космические аппараты и технологии. – 2019. – Т. 3, № 3 (29). – С. 164–170. – DOI 10.26732/2618-7957-2019-3-164-170. – 0.59 / 0.22 а.л.

3. Бельков А. В. Метод расчета напряженно-деформированного состояния вантово-оболочечных конструкций космических антенных рефлекторов / А. В. Бельков, С. В. Белов, А. П. Жуков, М. С. Павлов, С. В. Пономарев, **С. А. Кузнецов** // Вестник Томского государственного университета. Математика и механика. – 2019. – № 62. – С. 5–18. – DOI: 10.17223/19988621/62/1. – 0.63 / 0.21 а.л.

*Web of Science:* Belkov A. V. Method for calculation of the stress-strain state for cable-membrane space reflector structures / A. V. Belkov, S. V. Belov, A. P. Zhukov, M. S. Pavlov, S. V. Ponomarev, **S. A. Kuznetsov** // Vestnik Tomskogo Gosudarstvennogo Universiteta-Matematika I Mekhanika–Tomsk State university journal of mathematics and mechanics. – 2019. – № 62. – С. 5–18.

На автореферат поступило 5 положительных отзывов. Отзывы представили:

1. **М. А. Дмитриева**, д-р физ.-мат. наук, доц., заведующий кафедрой градостроительства, землеустройства и дизайна Балтийского федерального университета имени Иммануила Канта, г. Калининград, *без замечаний*.
2. **В. А. Бернс**, д-р техн. наук, проф., профессор кафедры прочности летательных аппаратов Новосибирского государственного технического университета, *с замечанием*: нет информации о том, как учитывается влияние температуры окружающей среды на деформации элементов рефлектора – ванты при функционировании на орбите.
3. **Г. Н. Кувыркин**, д-р техн. наук, проф., заведующий кафедрой прикладной математики Московского государственного технического университета имени Н.Э. Баумана (национального исследовательского университета), *с замечаниями*: на рисунке 1 отсутствуют размерности указанных величин; в автореферате не указаны причины рассмотрения электрического напряжения в виде пилообразного сигнала.
4. **В.М. Садовский**, д-р физ.-мат. наук, проф., директор Института вычислительного моделирования СО РАН – обособленного подразделения Федерального исследовательского центра «Красноярский научный центр Сибирского отделения Российской академии наук», *с замечаниями*: на рисунке 1 автореферата не приведены размерности величин; из автореферата не ясно, почему электрическое напряжение рассматривается только в виде пилообразного сигнала.
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 замечаниями*: на рисунке 1 (стр.11) не указана размерность приведенных значений; на рисунке 3 не указано условие, сдерживающее нижнюю часть расчетной геометрической модели ПП типа «Захват».

В отзывах отмечается, что тема исследования представляет актуальную научно-техническую задачу для развития производства и создания перспективных отечественных космических аппаратов связи с крупногабаритными трансформируемыми рефлекторами, так как в подобных рефлекторах, без применения активных систем регулировки натяжений в вантовых элементах, точность отражающей поверхности ухудшается пропорционально увеличению диаметра. При этом натурные экспериментальные исследования крупногабаритных рефлекторов и их наземная отработка требуют больших материальных затрат,

поэтому развитие численного моделирования данного направления имеет важное практическое значение, а также способствует развитию современных методов механики деформируемого твердого тела. С. А. Кузнецовым разработана инженерная модель пьезопривода, учитывающая свойства пьезопакета и всей колебательной системы, что позволяет определить зону устойчивой и неустойчивой работы пьезопривода; выполнено численное моделирование напряженно-деформированного состояния и динамических характеристик активных вантовых элементов с пьезоприводами; проведено экспериментальное исследование реализуемости процесса регулирования длины активных вантовых элементов с пьезоприводами. Исследование является практически значимым для отечественной космической отрасли, что подтверждено результатами внедрения на ведущем отечественном предприятии космической отрасли – АО «Информационные спутниковые системы» имени академика М.Ф. Решетнева».

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, моделировании деформирования и разрушения материалов при динамических нагрузках, **Г. Е. Уцын** является известным специалистом в области математического моделирования механоэлектрических процессов, расчета электрофизических свойств композиционных материалов, **Балтийский федеральный университет имени Иммануила Канта** известен своими достижениями в области механики деформируемого твердого тела, а также проектировании и численном моделировании различных конструкций.

**Диссертационный совет отмечает, что на основании выполненных соискателем исследований:**

*разработана* электроупругая модель управляющих вант с пьезонатяжителями системы регулировки формы отражающей поверхности крупногабаритного трансформируемого антенного рефлектора космического аппарата, учитывающая геометрическую нелинейность формообразующей системы, нелинейность контакта взаимодействующих активных элементов конструкции пьезопривода и физическую нелинейность деформирования самих вант, позволяющая моделировать динамические аспекты корректировки длин вант;

*разработана* вычислительная модель вантовых элементов с пьезонатяжителями и методика ее реализации, учитывающая особенности контактного и электроупругого деформирования, позволяющая проектировать пьезонатяжитель с характеристиками соответствующими разрабатываемой системе регулировки;

*разработан* алгоритм численного решения нелинейной задачи механического поведения прецизионной системы регулировки формы отражающей поверхности крупногабаритного трансформируемого антенного рефлектора с вантовыми пьезонатяжителями;

*разработана* модель, учитывающая свойства пьезопакета и всей колебательной системы, позволяющая определять зону устойчивой и неустойчивой работы пьезонатяжителя;

*получены* новые экспериментальные данные процесса регулировки формы отражающей поверхности рефлектора с вантовой формообразующей структурой с использованием специально разработанного стенда, учитывающего нелинейность жесткости тыльной и фронтальной сетей рефлектора;

*исследованы* зоны устойчивой работы пьезопривода типа «Захват» характеризующие двигательный режим и режим двигательного торможения, а также зоны неустойчивой работы в зависимости от частоты воздействия.

**Теоретическая значимость исследования обоснована тем, что:**

*решена* задача механического поведения прецизионной системы регулировки формы отражающей поверхности крупногабаритного трансформируемого антенного рефлектора с вантовыми пьезонатяжителями в новой постановке, что позволяет прогнозировать состояние системы в период срока активного существования;

*предложен* комплекс методов и подходов, расширяющих возможности численного анализа систем активной регулировки длин вант с позиции нелинейной теории упругости и являющихся теоретической основой для проектирования крупногабаритных трансформируемых антенных рефлекторов с системой активного регулирования на основе пьезоприводов, что является обоснованием реализуемости метода управления точностью отражающей поверхности рефлектора на орбите.

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

*разработаны, внедрены и используются* при выполнении научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ в АО «Информационные спутниковые системы» имени академика М.Ф. Решетнева» (г. Железногорск Красноярского края): вычислительная модель вантовых элементов с пьезонатяжителями, позволяющая проектировать пьезонатяжители с характеристиками, соответствующими разрабатываемой системе регулировки; алгоритм численного решения нелинейной задачи механического поведения прецизионной системы регулировки формы отражающей поверхности крупногабаритного трансформируемого антенного рефлектора с вантовыми пьезонатяжителями; методы расчета и моделирования режимов работы системы регулировки длин вант.

**Рекомендации об использовании результатов диссертационного исследования.** Результаты диссертационной работы имеют фундаментальный и прикладной характер. Разработанные модели могут быть использованы при определении напряженно-деформированного состояния элементов системы регулирования длин вант. Большое практическое значение результаты имеют при проектировании крупногабаритных трансформируемых антенных рефлекторов для обеспечения точности отражающей поверхности в космосе. Основное практическое применение результаты найдут в космической отрасли, а также в научных учреждениях: Институте теоретической и прикладной механики им. С.А. Христиановича СО РАН (г. Новосибирск), Институте проблем механики им. А.Ю. Ишлинского РАН (г. Москва) и др.; в высших учебных заведениях: Национальном исследовательском Томском государственном университете, Московском авиационном институте, Сибирском государственном университете науки и технологий имени академика М.Ф. Решетнева (г. Красноярск) и др.

**Оценка достоверности результатов исследования выявила:**

*адекватность* математической модели напряженно-деформированного состояния вантово-оболочечных конструкций, учитывающей их геометрическую нелинейность;

*подтверждена* сходимость итерационного процесса в методе конечных элементов результатами расчетов для различных пространственных сеток конечно-элементной модели рефлекторов;

*установлено* качественное и количественное согласование полученных автором результатов численного моделирования и результатов экспериментальных исследований.

**Научная новизна** результатов диссертационного исследования заключается в том, что впервые при моделировании напряженно-деформированного состояния формообразующей системы крупногабаритных трансформируемых антенных рефлекторов с активными вантовыми элементами учитывается комплекс нелинейностей различного рода (геометрической и контактной), реологический характер деформирования (ползучести) вантовых элементов в течение всего срока активного существования космического аппарата и динамический процесс регулирования пьезоприводами; разработана и исследована модель вантовых элементов системы регулирования формы отражающей поверхности крупногабаритных трансформируемых антенных рефлекторов, которая учитывает геометрическую нелинейность формообразующей структуры, нелинейность контактного взаимодействия элементов пьезопривода, нелинейность деформирования вант и динамический характер корректировки длин вант; разработан алгоритм решения нелинейной задачи механического поведения активных вантовых элементов с пьезоприводами системы регулирования формы отражающей поверхности крупногабаритных трансформируемых антенных рефлекторов; разработана инженерная модель, учитывающая свойства всей колебательной системы пьезопривода и позволяющая определять области устойчивой и неустойчивой работы; предложен подход и получены экспериментальные данные процесса работы пьезопривода при регулировке формы отражающей поверхности сетчатого рефлектора на специальном стенде, моделирующем нелинейности жесткостей тыльной и фронтальной сетей рефлектора; исследованы зоны устойчивой и неустойчивой работы пьезопривода типа «Захват» для двигательного режима и режим двигательного торможения, в зависимости от частоты воздействия.

**Личный вклад соискателя состоит в:** личном участии в разработке методов и моделей для программного комплекса ANSYS, обработке и анализе результатов, подготовке и проведении экспериментов, подготовке статей, тезисов и докладов на конференциях. Совместно с научным руководителем были поставлены цель и задачи, сформулированы основные выводы по диссертации.

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 значение для развития механики деформируемого твердого тела.

На заседании 02.07.2020 диссертационный совет принял решение присудить **Кузнецову С. А.** ученую степень кандидата физико-математических наук.

При проведении тайного голосования диссертационный совет в количестве 19 человек, из них 7 докторов наук по специальности 01.02.04 – Механика деформируемого твердого тела, участвовавших в заседании, из 26 человек, входящих в состав совета, проголосовал: за – 19, против – нет, недействительных бюллетеней – нет.

Председатель

диссертационного совета

Шрагер Геннадий Рафаилович

Ученый секретарь

диссертационного совета

Пикущак Елизавета Владимировна

02.07.2020