

Министерство науки и высшего образования  
Российской Федерации



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](mailto:bauman@bmstu.ru)  
ОГРН 1027739051779  
ИНН 7701002520 КПП 770101001

29.09.2021 № 01.03-10/212

на № \_\_\_\_\_ от \_\_\_\_\_

Проректору ФГБОУ ВО «Московский  
авиационный институт (национальный  
исследовательский университет)»  
по научной работе, д.т.н., профессору

Ю. А. Равиковичу

125993, г. Москва, Волоколамское ш., 4

Уважаемый Юрий Александрович!

Направляю Вам отзыв ведущей организации ФГБОУ ВО «Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана (национальный исследовательский университет)» по диссертации Русских Сергея Владимировича на тему «Нелинейная механика упругих трансформируемых и управляемых космических систем», представленной на соискание ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 01.02.04 – «Механика деформируемого твердого тела».

Приложение: Отзыв в 2-х экз.

Первый проректор – проректор по  
научной работе и  
стратегическому развитию

Коробец Б.Н.

Уддел документационного  
обеспечения МАИ

30 09 2021 г.

Исп. Зимин В.Н.  
тел. 8 499 261-01-07

«УТВЕРЖДАЮ»

Первый проректор – проректор по научной  
работе и стратегическому развитию

ФГБОУ ВО «Московский государственный  
технический университет имени Н.Э. Баумана

(национальный исследовательский

университет)», доктор технических наук, доцент



Коробец Б.Н.

2021 г.

### ОТЗЫВ

ведущей организации на диссертацию Русских Сергея Владимировича «Нелинейная механика упругих трансформируемых и управляемых космических систем», представленную на соискание ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 01.02.04 – «Механика деформируемого твердого тела»

#### Актуальность темы и цель диссертационной работы

При реализации научных программ освоения космического пространства возникает необходимость в создании на орбите объектов больших габаритов (десятки, сотни и более линейных размеров). Такими системами могут быть платформы и фермы солнечных батарей и электростанций, составные орбитальные станции, ретрансляторы энергии, рефлекторы крупногабаритных антенн, включающие в своем составе стержневые и тросовые подсистемы. Специфика невесомости в орбитальном полете позволяет их делать более ажурными, легкими и менее жесткими, чем на Земле. Ограниченные мощности средств выведения на орбиту полезной нагрузки приводят к необходимости использования новой (космической) технологии создания объектов на орбите. В основу её положена либо технология последовательного монтажа на орбите типовых модулей, образующих крупногабаритную конструкцию, либо технологии

Отдел документационного  
обеспечения МАИ

«30 09 2021 г.

развёртывания выведенного на орбиту компактно уложенного объекта. Конструкции, развёртываемые на орбите для приобретения рабочей конфигурации, принято называть *трансформируемыми*. При разработке и создании таких конструкций инженеру приходится решать специфические задачи, в частности, связанные с выбором конструктивной схемы объекта, конструкционных материалов, разработкой схемы и механизма развёртывания, а также с построением соответствующих математических моделей управления процессом развёртывания, приводящих к необходимости использовать нелинейные уравнения движения при учете конечных перемещений и углов поворота объекта как жесткого целого.

Диссертация Русских С.В. посвящена построению уточненных математических моделей для численного решения нелинейных задач механики больших упругих космических систем, к которым относятся: плоские стержневые системы с тросовыми элементами; панели солнечных батарей космического аппарата; космическая антенна зонтичного типа; стержень-удлинитель, присоединенный к космическому аппарату (может рассматриваться как выносная штанга). Отдельно стоит выделить рассматриваемый в работе класс задач, связанный с пассивным управлением нестационарными колебаниями линейных и нелинейных механических систем или их подсистем при конечных перемещениях и поворотах. Отмеченные проблемы являются недостаточно полно исследованными, что определяет *актуальность* темы диссертации и проведенных исследований в ее рамках.

Основными *целями и задачами* диссертационной работы являются:

1. Получение уравнений нелинейной динамики развёртывания плоской стержневой системы произвольной размерности, соединенной с подвижным космическим аппаратом. Численное решение ряда новых задач, в том числе с учетом возможных связей в виде растяжимых тросовых элементов.

2. Разработка принципиальной схемы силового каркаса космической зонтичной антенны с большим диаметром отражающей поверхности. Решение задачи развёртывания каркаса антенны с многосвязными гибкими радиальными стержнями из транспортировочного положения, а также разработка методики решения нелинейной статической задачи

формообразования радиальных ребер каркаса зонтичной антенны до задаваемого профиля поверхности вращения.

3. Исследование связанной задачи нестационарной теплопроводности и термоупругих колебаний тонкостенного стержня-удлинителя, соединенного с подвижным по углу крена космическим аппаратом, который подвергается прямому солнечному нагреву с учетом теплоизлучения и изменения углов падения солнечных лучей за счет изгиба и поворота стержня.

4. Разработка методик решения терминальных задач пассивного силового и кинематического управления упругими линейными и нелинейными системами с постоянными и переменными параметрами при их конечных передвижениях за определенное время из одного состояния в другое.

Выбранные направления исследования существенно расширяют область знаний в нелинейной механике больших космических конструкций и имеют важное *прикладное и теоретическое значение*.

Полученные результаты могут представлять интерес при создании новых видов космической техники, при проведении поисковых научно-прикладных исследований в таких организациях, как АО «НПО Лавочкина», ПАО «РКК «Энергия», АО «ИСС имени академика М.Ф. Решетнева», АО «РКЦ «Прогресс», ИПРИМ РАН, ИМАШ РАН, АО «НИИЭМ», МАИ, МГТУ им. Н.Э. Баумана, Самарский университет и др.

### **Научная новизна**

В диссертационной работе Русских С.В. получены следующие основные результаты, определяющие ее *научную новизну*:

1. Впервые представлена математическая модель движения в подвижной системе координат плоской системы упругих стержней, а также панелей солнечных батарей, соединенных между собой и с космическим аппаратом упруговязкими шарнирами, допускающими большие углы поворота, с аналитическими представлениями всех входящих в систему нелинейных дифференциальных уравнений коэффициентов.

2. Новая и оригинальная принципиальная схема разворачивания силового каркаса антенны зонтичного типа и метод решения обратной нелинейной задачи формообразования силового каркаса циклически симметричной космической антенны зонтичного типа. Каркас антенны

состоит из многозвенных радиальных стержней с упругими шарнирами, которые соединены в узлах по параллелям растяжимыми тросовыми элементами.

3. Решение в уточненной постановке связанных задач нестационарной теплопроводности и термоупругих колебаний длинного тонкостенного стержня с круговым поперечным сечением, связанного с подвижным по углу крена космическим аппаратом. В модели учитывается внешнее и внутреннее теплоизлучение и влияние углов поворота элементов стержня на углы падения солнечных лучей.

4. Рассмотрены эффективные методы решения линейных и нелинейных задач пассивного кинематического и силового терминального управления различными механическими системами при их конечных поворотах и перемещениях из одного состояния в другое за заданное время с устранением переходных нестационарных режимов колебаний в момент постановки на упоры.

### **Достоверность проведенных исследований**

При выводе уравнений нелинейной динамики используются известные методы механики деформируемого твердого тела (принцип возможных перемещений, уравнения Лагранжа в обобщенных координатах). При численных решениях полученных уравнений используются стандартные верифицированные вычислительные программы и методики – метод Адамса, метод Рунге-Кутты, метод обратного дифференцирования. На каждом этапе решения проводится верификация и проверка сходимости численных результатов расчета, что позволяет подтвердить *достоверность* проведенных исследований и полученных численных результатов.

### **Структура и объем работы**

Рецензируемая диссертационная работа Русских С.В. изложена на 324 листах, имеет достаточное количество поясняющих иллюстраций (213) и таблиц результатов расчета (18). Список литературы состоит из 205 наименований. Структура диссертации: введение; 6 глав с краткими вводными пояснениями и заключениями; общее заключение с формулировкой основных результатов.

*Введение* содержит подробный обзор литературы с обсуждением состояния проблемы и наиболее важных научных результатов по теме диссертации.

В *первой главе* представлены известные уравнения нелинейной динамики больших упругих космических конструкций в центральном гравитационном поле Земли. Уравнения записаны в перемещениях и конечных углах поворота системы как твердого тела и для обобщенных координат, представляющих собой относительные перемещения при нелинейных упругих деформациях в квадратичном приближении. На основе этих уравнений представлены математические модели нелинейной динамики пространственного и плоского движения космического аппарата с выпускаемым весомым тросом в центральном гравитационном поле Земли. Приведенные в этой главе общие уравнения составляют теоретическую основу последующих глав диссертации при рассмотрении прикладных задач динамики космических конструкций в процессах развертывания объектов и выполнения технологических операций на около земной орбите.

*Вторая глава* посвящена выводу нелинейной системы дифференциальных уравнений, описывающих в подвижной системе координат динамику плоского движения упругой стержневой системы произвольной размерности с тросовыми элементами, которая присоединена к подвижному космическому аппарату. Стержни связаны между собой упруго-вязкими шарнирами, допускающими большие углы поворота. Между двумя произвольными узлами может присутствовать растяжимый трос переменной длины, выполняющий роль связи. Изгиб каждого стержня описывается двумя заданными функциями формы. Приведены уравнения системы в обобщенных координатах со всеми необходимыми пояснениями и аналитическими выражениями коэффициентов, а также уравнения в матричном виде. На основе этого подхода также рассматривается нестационарный поворот и нелинейные колебания в плоскости крена симметричного космического аппарата с двумя упругими панелями солнечных батарей, состоящими из произвольного числа недеформируемых секций.

Полученные в этой главе результаты существенно дополняют класс математических моделей, описывающих процесс развертывания плоских стержневых систем из транспортного в рабочее положение.

*Третья глава* посвящена описанию функциональной схемы раскрытия циклически симметричного несущего каркаса антенны зонтичного типа, состоящего из радиальных многозвенных нерастяжимых стержней, которые связаны между собой в узлах по параллелям растяжимыми тросами. В первой части главы представлена нелинейная динамическая задача развертывания многозвенного упругого на изгиб радиального стержня каркаса антенны под действием предварительно сжатых пружин в шарнирах с учетом упоров. Во второй части главы решается обратная квазистатическая нелинейная задача формообразования антенны путем сильного изгиба радиальных стержней под действием реакций натяжения тросов в двух постановках: для пологой параболической поверхности; для произвольной однозначной поверхности вращения.

Полученные в этой главе результаты представляют интерес при проектировании и расчете крупногабаритных космических антенн зонтичного типа.

*Четвертая глава* посвящена исследованию в новой уточненной постановке связанной задачи нестационарной термоупругости и теплопроводности упругого на изгиб тонкостенного стержня с круговым поперечным сечением, присоединенного упруговязким шарниром к свободному по крену космическому аппарату. Стержень подвергается прямому солнечному нагреву с учетом изменения углов падения солнечных лучей за счет поворота и изгиба стержня. Учитывается тепловое излучение в космическое пространство и лучистый теплообмен на внутренней поверхности оболочки стержня.

Результаты данной главы могут быть применены при решении практической задачи оценки динамических характеристик системы «КА+ выносная штанга гравитационной стабилизации» при выходе из тени, а также при выполнении оценок его динамической термоупругой устойчивости.

*Пятая глава* посвящена общему подходу к получению уравнений движения упругих составных нелинейных систем с геометрическими связями. Предлагается на основании принципа возможных перемещений путем использования дифференциальных уравнений движения отдельных свободных систем в связанных с ними подвижных системах координат формировать нелинейную систему дифференциальных и алгебраических уравнений с учетом связей. В качестве отдельных подсистем рассмотрены

гибкий нерастяжимый стержень и растяжимый весомый трос. Преимущества подхода показаны на решении частной задачи, в которой рассматривается нестационарные колебания упругой консольной балки с шарнирно присоединенным вращающимся тяжелым телом.

Полученные в этой главе результаты могут стать основой для разработки методик численного исследования движения составных упругих систем большой размерности.

*Шестая глава* посвящена разработке новых и эффективных методов решения терминальных задач управления нестационарными колебаниями упругой системы при ее конечном передвижении из одного состояния покоя или движения в другое состояние. Для линейных систем с постоянными параметрами используется разложение по собственным формам колебаний. При этом разрешающие уравнения, записанные в нормальных координатах, решаются аналитически точно. Управляющее воздействие представляется несколькими членами ряда простых для практической реализации функции времени с неизвестными коэффициентами, которые определяются из начальных и конечных условий. Для систем, совершающих многократные однотипные операции, предлагается альтернативный подход, основанный на настройке параметров системы таким образом, чтобы ее собственные частоты удовлетворяли определенным установленным соотношениям. При этом управляющие воздействия могут быть взяты в виде простых заданных функций. Для решения задач управления линейными системами с переменными параметрами или нелинейными системами предлагается использовать разложение обобщенных координат, описывающих движение системы, по заданным базисным функциям времени с неизвестными коэффициентами, которые определяются по методу Бубнова–Галеркина. Управляющая функция при этом ищется в виде конечного ряда по синусам. Для рассматриваемой нелинейной системы получены разрешающие нелинейные алгебраические уравнения, решение которых проводится методом последовательных приближений.

Результаты главы могут быть адаптированы для решения практических задач управления, таких как, например, автоматизированные операции сборки на орбите Земли, управляемые движения крана-манипулятора, динамика управляемых подъемно-транспортных устройств и т.д.



В целом, изложение материала в диссертации четкое. Все результаты снабжены многочисленными примерами расчета с оценками точности и сходимости.

Текст *автореферата* полностью соответствует содержанию диссертации. Список *опубликованных работ* по теме диссертации, состоящий из 41 пункта, дает полное представление об объеме проведенных исследований. *Апробация* работы представлена в виде докладов на всероссийских и международных конференциях и симпозиумах.

### **По работе имеются следующие замечания**

1) В качестве основополагающего математического аппарата, исходных определений и соотношений в первой главе диссертации представлены общие нелинейные и линеаризованные уравнения динамики больших упругих космических конструкций. Замечено дословное совпадение по тексту и рисункам представленного в работе материала с содержанием главы 4 монографии [6] *Гришанина Т.В., Шклярчук Ф.Н. Динамика упругих управляемых конструкций*. – М.: Издательство МАИ, 2007. – 328с. (для сравнения: а) стр. 32-48 диссертации и п.п. 4.1, 4.2, 4.3, 4.4 стр. 118 – 137 монографии [6]; б) стр. 49-53 и п. 4.6.1 (стр.143-150) монографии [6]). Упомянутое замечание не умаляет значения результатов и достижений, полученных автором в последующих главах диссертации.

2) При рассмотрении алгоритма решения задачи динамики раскрытия из транспортного состояния и формообразования каркаса пологой антенны, к сожалению, не предусмотрена оценка влияния технологического разброса параметров предварительно сжатых пружин в узлах раскрытия и длин растяжимых тросов, соединяющих по параллелям стержни каркаса, на искажение циклической симметрии каркаса зонтичной антенны при формообразовании (к главе 3).

3) При решении обратной задачи формообразования каркаса космической зонтичной антенны, состоящей из циклически симметричной системы многозвенных гибких радиальных стержней, соединенных между собой в узлах по параллелям растяжимыми тросами, в качестве варьируемых проектных параметров рассматриваются жесткости тросов на растяжение. При этом неясно, как выбираются необходимые жесткости звеньев

радиальных стержней и почему они не рассматриваются в качестве проектных параметров (к главе 3).

4) Для рассмотренной связанной нелинейной задачи теплопроводности при солнечном нагреве и термоупругих колебаний тонкостенного длинного стержня, установленного на космическом аппарате, было бы полезно в качестве иллюстрации возможностей представленного решения провести на основе линеаризованных уравнений оценку динамической устойчивости стержня типа термоупругого флаттера (к главе 4).

5) К замечаниям по оформлению графически представляемых результатов следует отнести отсутствие наименований осей координат на рисунках, иллюстрирующих этапы расчета (например, рис. 3.3.5, 3.3.7, 3.3.11, 3.3.13, 3.3.15), хотя по тексту можно установить их определение.

6) На стр. 58 в п. 2.1.1 постановка задачи о движении свободной составной системы «КА+стержневая система» в центральном гравитационном поле по тексту (4-ая, 7-ая, 13-ая строки сверху) вместо термина «центр тяжести» следует понимать термин «центр масс».

Указанные выше замечания не являются критическими с точки зрения общей положительной оценки представленной работы.

## **Заключение**

Рассмотренная диссертация Русских С.В. является законченной научно-квалификационной работой, которая удовлетворяет требованиям ВАК, предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени доктора физико-математических наук. В работе решена актуальная научно-техническая проблема, расширяющая область знаний по нелинейной механике больших упругих трансформируемых и управляемых космических конструкций. Новизна полученных результатов, их достоверность, практическое и теоретическое значение показаны на многочисленных примерах и сомнений не вызывают.

Рецензируемая диссертация Русских С.В. удовлетворяет критериям и требованиям, установленным Положением «О порядке присуждения ученых степеней», а ее автор Русских Сергей Владимирович заслуживает присуждения ему ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 01.02.04 – «Механика деформируемого твердого тела».

Отзыв обсужден и одобрен на заседании кафедры СМ-1 «Космические аппараты и ракеты-носители» МГТУ им. Н.Э. Баумана, протокол № 13 от 20.09.2021 г.

Заведующий кафедрой СМ-1 «Космические аппараты и ракеты-носители», доктор технических наук, старший научный сотрудник



Зимин  
Владимир Николаевич

«20» 09 2021 г.

Контактные данные организации:

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана (национальный исследовательский университет)»

Адрес: 105005, г. Москва, ул. 2-я Бауманская, д. 5, к. 1

Телефон: +7 (499) 263 63 91

Веб-сайт: <https://bmstu.ru/>

Адрес электронной почты: [bauman@bmstu.ru](mailto:bauman@bmstu.ru)