

ОТЗЫВ

официального оппонента
доктора физико-математических наук В.А. Бужинского
на диссертационную работу 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»

Диссертационная работа С.В. Русских посвящена разработке методов решения задач нелинейной механики космических аппаратов (КА), содержащих крупногабаритные трансформируемые упругие конструкции со стержневыми и тросовыми элементами. Такими конструкциями являются панели солнечных батарей (БС), антенные рефлекторы больших размеров, длинные выносные штанги с приборами для физических измерений, тросовые элементы гибких связей с выносными объектами. Динамические свойства КА, влияющие на качество стабилизации их движения и точность ориентации, а также функционирование приборов, в существенной мере определяются этими конструкциями.

Решение в орбитальном полете современных функциональных задач приводит к возрастанию требований к энергетике на борту КА, повышаются требования к чувствительности антенных рефлекторов, что ведет к увеличению габаритов панелей БС и рефлекторов до весьма больших размеров. При выведении эти конструкции находятся в сложенном компактном состоянии под обтекателями ракет-носителей. Развертывание таких крупногабаритных конструкций на орбите - ответственная техническая проблема, связанная с решением сложных нелинейных задач механики. Крупногабаритные антенные рефлекторы КА необходимо не только раскрыть, но и с высокой точностью привести их отражающие поверхности к требуемой геометрической форме. Расширение проводимых на орбите Земли операций привело к появлению манипуляторов и к необходимости решения нелинейных и

нелинейных задач механики, связанных с перемещением грузов с гашением упругих колебаний их конструкции и колебаний перемещаемых грузов в конце операции перемещения.

Проведение наземной экспериментальной отработки раскрытия крупногабаритных трансформируемых космических конструкций сопряжено с преодолением значительных технических сложностей для выполнения условий, соответствующих невесомости в орбитальном полете, когда основными являются только гравитационные силы. Из-за больших габаритов и высокой гибкости, связанной с требованиями минимизации веса, такие конструкции не способны в земных лабораторных условиях поддерживать свою форму под действием сил тяжести.

Ограниченные возможности экспериментального решения проблем нелинейной динамики современных и проектируемых перспективных конструкций КА делают особенно востребованным дальнейшее развитие численных методов их решения. **Актуальность темы** диссертационной работы определяется ее направленностью на решение перечисленных современных проблем нелинейной динамики космических аппаратов с крупногабаритными трансформируемыми конструкциями и решение задач перемещения грузов в заданное положение с гашением колебаний в конце операции перемещения.

Диссертационная работа состоит из введения и шести глав. Во введении дается аналитический обзор литературы по проблемам нелинейной механике конструкций КА и методам их решения. На основе сделанного обзора обосновывается актуальность темы исследования, ставятся цели и задачи исследования, приводится краткая характеристика полученных научных результатов и их практической значимости.

Первая глава диссертации является вводной. В ней приводятся известные методы составления общих уравнений нелинейной динамики КА с крупногабаритными трансформируемыми упругими конструкциями и тросовыми элементами. Эти методы используются в следующих главах для

составления уравнений, предназначенных для решения рассматриваемых классов нелинейных задач механики.

Во второй главе в плоской постановке рассмотрена нелинейная динамика КА с системой шарнирно соединенных упругих стержней. Принимается, что КА может совершать произвольные плоские перемещения и вращение вокруг оси, проходящей через его центр масс, как недеформируемое свободное твердое тело с немалыми углами поворота стержней в их шарнирах. Между шарнирами может иметься связь в виде растяжимого троса с изменяемой по заданному закону длиной. Нелинейные уравнения движения в подвижной системе координат выведены с использованием принципа возможных перемещений. Приведены решения задач о раскрытии из сложенного состояния системы стержней при освобождении связей предварительно напряженных узловых пружин и при освобождении связей под действием сил инерции вращающегося твердого тела. Представлены примеры анализа на действие на КА управляющего момента по крену и развертывания панелей БС при различных начальных условиях.

Новая интересная в научном отношении и имеющая большое практическое значение задача развертывания космической циклически симметричной антенны зонтичного типа рассмотрена в главе 3. Предложена функциональная схема раскрытия и формообразования полотна антенны на орбите из транспортного положения в функциональное положение. Сначала путем освобождения связей под действием предварительно напряженных пружин в шарнирах происходит динамический процесс раскрытия антенны в состояние, в котором стержни каркаса приводятся с выходом на упоры в недеформированное пространственное положение под углом к осевой линии антенны. Тросовые элементы, присоединенные к узлам стержневых элементов каркаса антенны, при этом становятся прямолинейными, но ненапряженными, и образуют правильный многоугольник. Затем путем выдвижения специального гидроцилиндра, на котором находится каркас антенны, тросы растягиваются, а стержни изгибаются под действием их натяжения. Приведены примеры решения задач о формообразовании параболической поверхности полотна

антенны. Решения получены при различных значениях параметра параболической формы антенны и различном количестве звеньев каждого из стержней каркаса с шарнирными соединениями. Проведены оценки точности геометрической формы рефлектора в полученных решениях.

В четвертой главе предложена математическая модель движения КА с присоединенным к нему тонкостенным стержнем кругового поперечного сечения, подвергающегося солнечному нагреву, при учете теплового излучения в космическое пространство и лучистого теплообмена на внутренней поверхности стержня. Приведены результаты численного интегрирования связанных уравнений термоупругости и теплопроводности. На примере решения задач о выходе КА из тени исследовано влияние излучения и инерционных сил стержня на движение КА.

В главе 5 представлен общий прием получения уравнений движения составных нелинейных упругих систем с геометрическими связями. Уравнения движения составной системы получаются с использованием принципа возможных перемещений Даламбера-Лагранжа с учетом вариации работы неизвестных реакций и добавления к ним уравнений связей. Рассмотрены два важных в практическом отношении примера составления уравнений, описывающих движение таких составных систем: звена космического крана-манипулятора, закручиваемого и изгибаемого в двух плоскостях, и весомого троса для перемещения объектов, совершающего трехмерные нелинейные колебания. Результаты численных исследований приведены для консольной балки, к концу которой шарнирно присоединено тяжелое твердое тело, совершающее вращательное движение с большими углами поворота.

В шестой главе рассматриваются оригинальные методы решения двумерных задач силового и кинематического управления упругими системами при конечных передвижениях из состояния покоя или движения в другое состояние покоя или движения с гашением колебаний. Задачи рассматриваются в линейной и нелинейной постановке. На конкретных примерах исследуются границы применимости решения задач в линейной

постановке. Приводится решение задачи о развороте по крену КА с двумя панелями БС, которые расположены симметрично, с гашением колебаний в конце разворота. Принимается, что панели состоят из недеформируемых секций, соединенных между собой и с КА шарнирными узлами с упругими пружинами. Оценивается влияние нелинейности колебаний панелей БС. Представлены решения задач о поступательных перемещениях упругой балки с тяжелой массой на ее конце и конечном передвижении тяжелого твердого тела на тросе постоянной и переменной длины. Для быстродействующих манипуляторов, выполняющих однотипные операции, предложен новый метод устранения колебаний в конце каждой операции простой управляющей функцией путем настройки нескольких низших собственных частот упругих колебаний.

В заключении перечислены основные результаты выполненных в диссертационной работе исследований, отражающие ее научную новизну и практическую значимость.

Структура диссертационной работы логична и отвечает задачам исследований, обладает внутренним единством, содержит новые научные результаты и положения, а публикации свидетельствуют о личном вкладе автора в науку. **Новизна** выносимых на защиту научно-технических положений состоит в разработке:

- математической модели и метода исследования нелинейных процессов развертывания в подвижной системе координат плоской стержневой конструкции, которой могут представляться панели БС КА, с секциями, соединенными в узлах упруго-вязкими шарнирами;
- новой функциональной схемы и оригинальных методов решения нелинейных задач, связанных с раскрытием космической антенны зонтичного типа, и управления геометрической формой рефлектора путем натяжения растяжимых тросов, присоединенных к узлам упругих стержней каркаса антенны;
- метода решения в уточненной постановке связанных задач термоупругих колебаний и теплопроводности тонкостенного стержня

кругового поперечного сечения, вынесенного за подвижный по углу поворота КА, при солнечном нагреве после выхода КА из тени;

- новых эффективных методов решения линейных и нелинейных задач управления упругими системами при их конечных перемещениях за определенное время из состояния покоя или движения в другое состояние покоя или движения с гашением колебаний.

Обоснованность выдвинутых научных положений, выводов и рекомендаций, сформулированных в диссертации, их достоверность основывается на корректном использовании методов механики деформируемого твердого тела и применении строгих математических методов. Уравнения нелинейной динамики получены на основе принципа возможных перемещений Даламбера-Лагранжа. При решении задач использовались метод Бубнова-Галеркина и метод конечных элементов. Численное интегрирование систем нелинейных дифференциальных проводилось с использованием современных программных комплексов. Для проверки применяемых численных алгоритмов проводилось решение тестовых задач, исследование сходимости результатов расчетов и сравнение полученных численных данных с результатами, имеющимися в литературе.

Теоретическая и практическая ценность и значимость работы заключается в получении общих уравнений нелинейной динамики, которые могут использоваться для исследования процессов развертывания на орбите крупногабаритных упругих космических конструкций. Предложенная оригинальная функциональная схема и расчетные модели динамического раскрытия и статического формообразования каркаса стержневых элементов натяжением тросов предназначены для отработки создания крупногабаритных космических рефлекторов зонтичного типа. Разработанные оригинальные методы решения терминальных задач управления линейными и нелинейными упругими системами с гашением колебаний при конечных перемещениях из одного состояния покоя или движения в другое состояние покоя или движения могут быть использованы при выполнении разворота КА с упругими панелями БС и различных наземных технических процессах. Практическая ценность

работы состоит также в том, что разработанные методы могут быть применены для моделирования экспериментальной отработки процессов раскрытия космических конструкций в наземных лабораторных условиях с учетом влияния подвесных систем. Это позволит провести уточнение математических моделей для переноса на орбитальные условия с учетом согласования с результатами испытаний.

По диссертационной работе имеются следующие замечания:

1. Упругие перемещения стержневой системы в главе 2 учитываются обобщенными координатами только в шарнирных узлах. Тем самым каждый стержень представляется одним конечным элементом. Ограничения на длину и упругие свойства стержней при этом не накладываются. Возможные погрешности принятия такой расчетной схемы не обсуждаются.

2. При рассмотрении задачи о раскрытии панели БС КА подразумевается, что вращение происходит вокруг главной оси инерции, а оси панелей находятся на линии пересечения с центром масс. Второе из этих допущений может не выполняться. Приводится решение плоской задачи, но следовало бы обсудить границы применимости и возможные погрешности, связанные с пространственным характером движения при невыполнении принятого допущения.

3. Отсутствует сравнение с решением аналогичных задач в программном комплексе автоматизированного динамического анализа многокомпонентных механических систем EULER, разработанного специалистами ООО «АвтоМеханика» с участием преподавателей и аспирантов Московского государственного университета им. М.В. Ломоносова.

4. Узлы соединений звеньев стержневых систем принимаются упруго-вязкими шарнирами. Упругие и диссипативные характеристики узлов в шарнирных соединениях БС КА и рефлекторов являются нелинейными. При решении задач, связанных с раскрытием и управление колебаниями космических конструкций, не обсуждаются оценки погрешностей, возникающих из-за нелинейных свойств узлов соединений.

5. При решении задач о терминальном управлении упругими системами, которые переводятся в новое состояние с гашением колебаний в конце перемещения, не учитываются диссипативные силы и не обсуждается их влияние на получаемые результаты.

6. В работе не представлен важный в практическом отношении анализ динамических нагрузок на элементы конструкций в процессах раскрытия и терминального управления с гашением колебаний, которые для крупногабаритных панелей БС КА могут приводить недопустимым деформациям и разрушению элементов конструкции.

7. Несмотря на то, что представляется чисто теоретическое исследование, к числу недостатков можно отнести также полное отсутствие каких-либо экспериментальных данных. Получить качественные орбитальные данные практически невозможно, но вполне возможно было привести динамические характеристики шарнирных узлов соединений элементов космических конструкций.

Сделанные замечания не препятствуют положительной оценке диссертации. Совокупность полученных в диссертации новых научных результатов можно квалифицировать как эффективное решение ряда задач, имеющих существенное значение в области нелинейной механики трансформируемых и управляемых космических конструкций.

Диссертация имеет внутреннее единство, прикладное значение и свидетельствует о вкладе ее автора в науку. Основные результаты диссертации опубликованы в работах, представленных в базах данных Scopus, Web of Science и в рекомендуемых ВАК изданиях, а также в многочисленных трудах отечественных и международных конференций и в полной мере отражают ее содержание.

Автореферат правильно отражает содержание диссертации.

Диссертация С.В. Русских представляет собой вполне законченную в части поставленных целей высококвалифицированную научную работу, выполненную на актуальную тему, а ее результаты имеют народно-хозяйственное и оборонное значение.

Считаю, что диссертационная работа С.В. Русских «Нелинейная механика упругих трансформируемых и управляемых космических систем» удовлетворяет требованиям, предъявляемым ВАК к диссертациям на соискание ученой степени доктора физико-математических наук. Автор диссертации, Русских Сергей Владимирович, заслуживает присуждения ему ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 01.02.04 – «Механика деформируемого твердого тела».

Официальный оппонент
доктор физико-математических наук,
начальник отдела Динамики РКТ
АО «ЦНИИмаш»

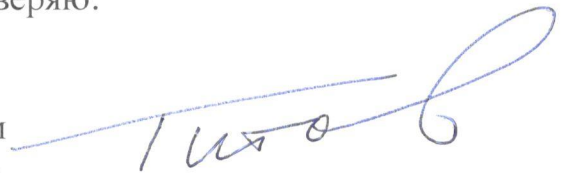


В.А.Бужинский

Адрес места работы:
141070, г. Королев Московской области, ул. Пионерская, д. 4.
Тел.: 8(495)513-48-57, e-mail: dd5556@tsniimash.ru
Специальность ВАК, по которой защищена диссертация,
01.02.05 – «Механика жидкости, газа и плазмы».

Подпись официального оппонента
доктора физико-математических наук,
начальника отдела В.А. Бужинского удостоверяю:

Заместитель генерального директора
по прикладным исследованиям, испытаниям
и экспериментальной базе АО «ЦНИИмаш»
кандидат физико-математических наук



В.А. Титов



« 09 »

09

_____ 2021 г.