

ОТЗЫВ официального оппонента 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. Работа посвящена решению ряда задач нелинейной механики упругих трансформируемых и управляемых космических систем и конструкций. Разработке математических моделей таких систем посвящена достаточно обширная литература. Однако, построение уточненных математических моделей для численного решения нелинейных задач динамики упругих составных конструкций, совершающих в условиях космоса большие перемещения и повороты и большие упругие деформации, является актуальной задачей на современном этапе развития науки и техники. Определенные сложности также вызывает создание разворачиваемых на орбите космических антенн связи с диаметром отражающего зеркала более 6 метров. Большой практический интерес представляют также задачи пассивного силового или кинематического управления линейными или нелинейными механическими системами при их конечных передвижениях и поворотах из одного состояния в другое. Сказанное позволяет сделать вывод об актуальности проведенных исследований в диссертационной работе.

Научная новизна. Анализ основных полученных результатов, представленных в диссертационной работе, позволяет оценить высокую научную новизну проведенных обширных исследований в области нелинейной механики больших упругих и управляемых космических конструкций. Из результатов работы можно выделить:

- 1) Математическую модель разворачивания плоской системы шарнирно соединенных на концах упругих стержней с растяжимыми тросовыми элементами, для которой получены нелинейные дифференциальные уравнения в обобщенных координатах с аналитическими выражениями всех коэффициентов.
- 2) Оригинальную функциональную схему каркаса циклически симметричной космической зонтичной антенны с упругими на изгиб многозвенными радиальными

стержнями, связанными по параллелям растяжимыми тросами. На ее основе решена задача нелинейной динамики развертывания из транспортировочного положения, а также обратная нелинейная задача статики формообразования каркаса в двух постановках;

3) Математическую модель связанной нелинейной, нестационарной задачи теплопроводности и термоупругих колебаний тонкостенного стержня-удлинителя, соединенного с подвижным по крену космическим аппаратом. В модели учитывается внешнее и внутреннее теплоизлучение, а также влияние поворота и изгиба стержня на углы падения солнечных лучей на его поверхность;

4) Новые методы решения нелинейных терминальных задач пассивного управления упругими системами при их конечных передвижениях за определенное время из одного состояния в другое с гашением нестационарных колебаний в момент окончания операции.

Теоретическая и практическая ценность и значимость работы состоит в том, что полученные результаты могут служить основой для обоснованных и верифицированных решений различных прикладных задач космической техники: процессов сборки или выполнения функциональных и технологических операций на орбите; отработки развертывания панелей солнечных батарей и трансформируемых частей из их транспортировочного положения в рабочее; проектирования со всеми необходимыми расчетами космических развертываемых антенн; оценки переходных колебаний и динамической устойчивости спутников с упругими удлинителями в виде тонкостенных стержней при солнечном нагреве; автоматизированных операций сборки частей космических систем с контролем колебаний при их передвижениях на орбите.

Достоверность и обоснованность полученных результатов подтверждается:

- 1) строгими моделями и обоснованными методами механики деформируемого твердого тела;
- 2) оценками и сравнениями полученных численных и приближенных аналитических результатов с имеющимися в литературе для частных случаев;
- 3) использованием тестовых задач для проверки и верификации численных алгоритмов;

4) корректным исследованием сходимости полученных результатов расчета при численном решении с помощью стандартных программ систем нелинейных дифференциальных уравнений.

Диссертационная работа Русских С.В. состоит из 324 страниц машинописного текста, 213 рисунков, 18 таблиц, включает в себя введение, 6 глав, заключение и список публикаций и литературных источников из 205 ссылок.

Во введении, в соответствии с требованиями, автором обосновывается актуальность темы диссертации; формулируются цели и задачи исследования; на основании полученных результатов обосновывается научная новизна исследований и теоретическая и практическая значимость работы; изложены с необходимыми обоснованиями основные методы исследований; приведены сведения об апробации результатов работы и о важнейших публикациях автора. Также во введении приведен детальный и обстоятельный обзор литературы, относящийся к теме диссертации.

В первой главе представлены известные общие нелинейные уравнения динамики больших упругих космических конструкций в центральном гравитационном поле Земли для перемещений и конечных углов поворота системы как твердого тела и для обобщенных координат, представляющих относительные перемещения при нелинейных упругих деформациях в квадратичном приближении. На основе полученных уравнений рассмотрена динамика пространственного и плоского движения космического аппарата с выпускаемым растяжимым весомым тросом.

Во второй главе рассматривается нелинейная динамика плоской стержневой системы, состоящей из произвольного числа упругих стержней, которые связаны между собой упруговязкими узловыми шарнирами, допускающие большие повороты. Приведена полная запись полученной системы нелинейных дифференциальных уравнений с аналитическими выражениями всеми входящих в нее коэффициентов. Отдельно рассмотрен вопрос учета растяжимых тросов между произвольными шарнирами в качестве фиксирующей связи. Приведены многочисленные примеры расчета развертывания системы стержней из транспортировочного положения с верификациями полученных численных результатов. Во второй главе также рассматривается задача нестационарного

поворота космического аппарата с прикрепленными к нему двумя панелями солнечных батарей, состоящих из произвольного числа недеформируемых секций.

В третьей главе рассматривается предложенная Русских С.В. новая и оригинальная функциональная схема циклически симметричной антенны зонтичного типа, состоящей из произвольного числа радиальных многозвенных нерастяжимых стержней, которые связаны между собой в узлах по параллелям растяжимыми тросовыми элементами. По методике, разработанной во второй главе, решается задача развертывания конструкции антенны из транспортировочного положения в предварительное развернутое рабочее положение. Далее решаются нелинейные квазистатические задачи формообразования каркаса антенны в двух постановках: для пологой параболической поверхности вращения; для произвольной однозначной поверхности вращения при сильном изгибе радиальных стержней. Приведены примеры расчета параметров проектируемых зонтичных антенн с построением необходимых графиков и таблиц результатов.

В четвертой главе представлена математическая модель нестационарной теплопроводности и термоупругих изгибных колебаний длинного тонкостенного стержня с круглым поперечным сечением, соединенного упруговязким шарниром с космическим аппаратом; стержень подвергается прямому солнечному нагреву с учетом теплового излучения в космическое пространство и лучистого теплообмена на внутренней поверхности оболочки стержня. В модели учитывается изменение углов падения солнечных лучей на стержень за счет его изгиба и поворота вместе с космическим аппаратом. Рассмотрены примеры расчета для случая выхода аппарата на круговой орбите из тени с оценками влияния параметров системы и возможных упрощений задачи.

В пятой главе обсуждается общий подход получения уравнений движения упругих составных нелинейных систем с нелинейными геометрическими связями с использованием уравнений отдельных свободных систем в связанных с ними подвижных координатах, составленных на основе принципа возможных перемещений, с учетом неизвестных реакций взаимодействия и алгебраических условий связи. В качестве примеров подсистем рассмотрены: гибкий нерастяжимый стержень, изгибаемый в двух плоскостях и закручиваемый (гибкое звено космического крана-манипулятора); растяжимый весомый трос, совершающий нелинейные трехмерные колебания. Предложенный подход к составлению

дифференциально-алгебраических уравнений движения сложных механических систем рассмотрен на примере исследования нелинейных колебаний упругой нерастяжимой балки, на конце которой шарнирно прикреплено поворачивающееся по произвольному закону массивное твердое тело.

В шестой главе рассматриваются несколько терминальных задач управления нестационарными колебаниями упругих систем при их конечных передвижениях из одного состояния покоя или движения в другое состояние. Для решения этих задач в линейных и нелинейных постановках предложено несколько подходов. Для линейных систем с постоянными коэффициентами используется разложение движений по собственным формам колебаний, а управляющее воздействие ищется в виде конечного ряда простых (с точки зрения реализации) финитных функций времени. Также для подобных систем, совершающих многократно однотипные операции, устранение колебаний в конце каждой операции с помощью одной «простой» заданной управляющей функции осуществляется за счет «настройки» нескольких низших собственных частот колебаний системы на эту функцию путем варьирования параметров системы. Для решения задачи устранения колебаний в конце операции для линейных систем с переменными параметрами или нелинейных систем впервые предлагается подход, основанный на разложении обобщенных координат системы по заданным базисным функциям времени с неизвестными коэффициентами, которые определяются по методу Бубнова-Галеркина. Управляющая функция на интервале управления при этом ищется в виде конечного ряда по синусам. В случае нелинейных колебаний система разрешающих нелинейных алгебраических уравнений решается методом последовательных приближений. В качестве примеров управления нестационарными колебаниями рассмотрены: линейные колебания панелей солнечных батарей, прикрепленных к совершающему поворот по крену космическому аппарату; линейные и нелинейные колебания математического маятника переменной длины с подвижной точкой подвеса; перемещение тяжелого твердого тела, соединенного с подвижной точкой подвеса тросом переменной длины.

В заключении перечислены результаты работы, составляющие основу проведенного исследования и имеющие научную новизну и практическую значимость.

Список **опубликованных работ** по теме диссертации составляет 41 наименование, из которых: 17 работ в рецензируемых научных изданиях (5 статей из баз данных Scopus и Web of Science), 1 учебное пособие. **Содержание диссертации** полностью соответствует содержанию опубликованных работ. Существенных замечаний к качеству оформления диссертации и изложению материала нет.

Апробация работы. Результаты исследования доложены на ряде известных всероссийских и международных конференциях и симпозиумах. Число опубликованных научных работ соответствует рекомендациям ВАК.

Автореферат дает четкое представление о диссертации и в полной мере отражает ее содержание и проведенные исследования.

По тексту диссертации можно сделать следующие **замечания**:

- 1) Получение уравнений движения составных нелинейных систем со связями путем добавления реакций связей (множителей Лагранжа) к основным неизвестным упрощает процедуру составления уравнений. Однако такой подход приводит к связанным системам дифференциально-алгебраических уравнений (жесткие задачи), численное решение которых представляет трудности и требует исследования точности, сходимости и численной устойчивости решений – особенно для больших систем с медленными и быстрыми движениями, какими являются упругие космические системы. В диссертации такие численные исследования отсутствуют.
- 2) При формообразовании космической антенны зонтичного типа в расчетной модели точно согласуются с требуемой поверхностью вращения только координаты узловых точек, расположенных на радиальных стержнях. В работе не оцениваются рассогласования расчетной и требуемой форм поверхностей в других точках, которые могут повлиять на разрешающие характеристики антенны.

Заключение по диссертационной работе. Отмеченные замечания не снижают общей положительной оценки научных результатов работы и ее практической ценности. Полученные автором результаты достоверны, выводы и

заклучения обоснованы. Диссертация Русских С.В. выполнена на высоком уровне, а полученные результаты представляют научный и практический интерес.

Диссертация Русских С.В. является законченной самостоятельной научно-квалификационной работой, которая полностью соответствует всем требованиям п. 9 «Положения о присуждении ученых степеней», утвержденным постановлением Правительства РФ от 24 сентября 2013 г. №842, а ее автор 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, профессор, академик АН РТ,
профессор кафедры «Прочность конструкций» Федерального
государственного бюджетного образовательного учреждения
высшего образования «Казанский национальный исследовательский
технический университет им. А.Н.Туполева-КАИ»;


Специальность ВАК, по которой защищена диссертация:

01.02.04 «Механика деформируемого твердого тела»;

Адрес: 420111, г. Казань, ул. К. Маркса, д. 10;

Телефон: +7 (903) 306-64-84;

E-mail: vpajmushin@mail.ru.

20.09.2021 

Паймушин Виталий Николаевич

Подпись Паймушина В.Н. заверяю.

