

ОТЗЫВ

официального оппонента д.т.н. Бормотова Алексея Николаевича
о диссертационной работе Сердаковой Валерии Владимировны
на тему: «Исследование движения малого космического аппарата с учётом вызванных
температурным ударом возмущений», представленной на соискание учёной степени
кандидата технических наук по специальности

1.1.7 – Теоретическая механика, динамика машин (технические науки)

Актуальность темы диссертационного исследования

Актуальность проблемы исследования динамики движения точек упругой части космического аппарата при температурном ударе определяется необходимостью создания современной космической техники, которая при её эксплуатации в условиях космического пространства должна эффективно выполнять целевые задачи, испытывая воздействие факторов космической среды, к числу которых относится и температурный удар. Для малых космических аппаратов, где доля упругой части конструкции выше, чем для других космических аппаратов, без учёта температурного удара может существенно снижаться качество выполнения ряда целевых задач, таких как проведение высокоточного дистанционного зондирования Земли или реализация гравитационно-чувствительных процессов.

Актуальность диссертации заключается в том, что в ней получены оценки возмущений от температурного удара для малого космического аппарата с симметричной и несимметричной компоновкой панелей солнечных батарей с помощью построенных приближенных аналитических зависимостей составляющих вектора перемещений точек упругой части малого космического аппарата. Это стало фундаментом для разработанной системы управления на основе двигателей-маховиков, которая позволяет нивелировать температурный удар и повышать качество выполнения целевых задач.

Целью работы является повышение эффективности выполнения целевых задач малым космическим аппаратом путём учёта влияния температурного удара его упругих элементов. Для её достижения в работе решаются следующие задачи:

- 1 Моделирование динамики углового движения малого космического аппарата с упругими элементами при воздействии температурного удара.
- 2 Разработка метода учёта влияния движения точек панели солнечной батареи в процессе температурного удара на динамику малого космического аппарата.

3 Создание математической модели движения точек панели солнечной батареи в рамках одномерной модели теплопроводности для описания возмущений, действующих на малый космический аппарат в результате температурного удара.

4 Создание математической модели движения точек панели солнечной батареи в рамках двумерной модели теплопроводности для описания возмущений, действующих на малый космический аппарат в результате температурного удара.

5 Формулировка критериев использования двумерной модели теплопроводности для описания возмущений от температурного удара в различных ситуациях.

6 Проведение вычислительных экспериментов, направленных на оценку влияния температурного удара панели солнечной батареи на динамику малого космического аппарата.

Решение этих задач позволяет разработать систему управления угловым движением малого космического аппарата, компенсирующую возмущения от температурного удара и повышающую качество выполнения целевых задач. Таким образом, диссертация Сердаковой В.В. представляется актуальной с точки зрения научной и практической значимости.

Структура и объём диссертации

Диссертационная работа в целом по своему объёму, структуре и стилю изложения отвечает всем требованиям к оформлению кандидатских диссертаций. Она включает в себя следующие разделы: введение, четыре главы, заключение, список литературы и приложение. Материал диссертации изложен на 176 страницах, 152 страницы из этого объёма занимает основной текст работы. Материалы диссертации содержат 58 рисунков, 4 таблицы, 173 источника литературы, электронную копию акта возможности использования результатов работы в деятельности АО РКЦ «Прогресс» и две электронные копии свидетельств о государственной регистрации программы для ЭВМ.

Во введении обоснована актуальность исследования динамики углового движения малого космического аппарата с панелями солнечных батарей с учётом широкого спектра возмущений для решения современных целевых задач, например, высокоточного дистанционного зондирования Земли или реализации гравитационно-чувствительных процессов. Отмечено, что одним из значимых возмущений, которое не учитывалось для космических аппаратов среднего класса и орбитальных космических станций, является температурный удар упругих панелей солнечных батарей. Путём анализа работ в данной области показано, что относительное движение точек панели при температурном ударе может оказать существенное влияние на динамику углового движения малого

космического аппарата в аспекте качества выполнения им целевых задач. В связи с этим отмечена необходимость исследования динамики движения малого космического аппарата с учётом вызванных температурным ударом возмущений. Сформулирована цель диссертационной работы и перечислены основные задачи, решение которых позволяет её достичь.

В первой главе рассматривается современное состояние проблемы температурного удара упругих элементов малого космического аппарата и отмечается важность её изучения для развития космической техники, поскольку связанные с температурным ударом возмущения могут нарушать требования по микроускорениям, существенно влиять ориентацию малого космического аппарата и параметры его углового движения в аспекте решения задач высокоточной съёмки поверхности Земли, а также снижать управляемость при использовании перспективных панелей солнечных батарей типа ROSA.

Представлен алгоритм оценки возмущающих факторов от температурного удара.

- Решение задачи теплопроводности и определение динамического поля температур панели солнечной батареи;
- Решение соответствующей задачи термоупругости и определение закона движения точек панели солнечной батареи при температурном ударе;
- Определение силы инерции, возникающие при ускоренном движении панели солнечной батареи;
- Анализ движения малого космического аппарата, состоящего из твёрдого тела (корпус) и упругих тел (панели солнечной батареи) с учётом возмущающих факторов от температурного удара.

В главе описаны основные задачи диссертации, гарантирующие достижение поставленной в работе цели, и обозначены предполагаемые результаты, которые будут получены при решении этих задач.

Во второй главе решена задача термоупругости для одномерной модели теплопроводности. Отмечено, что в такой постановке возможна оценка максимального влияния температурного удара на угловое движение малого космического аппарата. Эта оценка имеет значение при решении об учёте температурного удара в модели движения малого космического аппарата. При решении одномерной задачи теплопроводности была предложена приближенная аппроксимация поля температур панели солнечной батареи. При решении соответствующей задачи термоупругости получены приближённые аналитические зависимости для компонентов вектора перемещений точек панели

солнечной батареи. Проведено численное моделирование в пакете ANSYS, результаты которого соответствуют предложенной приближенной аппроксимации.

В третьей главе решена задача термоупругости в рамках двумерной модели теплопроводности. Двумерность задачи физически определяется начальным прогибом панели солнечной батареи в момент температурного удара. Такая постановка даёт возможность статического учёта их собственных колебаний, возникающих от различных факторов, в том числе, и от температурного удара. В работе предполагается, что температурный удар существенно более динамичное явление, чем собственные колебания. Поэтому можно не учитывать динамику самих колебаний.

Сформулированы критерии перехода из одномерной постановки задачи в двумерную, определяющие значимость погрешностей одномерной постановки из-за предположения о плоской форме панели солнечной батареи в момент температурного удара.

Проведено численное моделирование температурного удара в рамках двумерной модели в пакете ANSYS с целью верификации приближенных аппроксимаций поля температур и прогибов в качестве их корректных оценок при вычислении возмущений от температурного удара. Выполнена валидация этих аппроксимаций путём сравнения с данными экспериментов, проведённых с панелью солнечной батареи ROSA в 2017 году на борту МКС, её уменьшенной моделью в наземной вакуумной камере и с секцией космической фермы в земных условиях на симуляторе космической среды КМ7. Показана хорошая сходимость результатов.

В четвёртой главе представлена математическая модель углового движения малого космического аппарата с учётом температурного удара и даны оценки возмущений от температурного удара. На этой основе разработан метод учёта его влияния, состоящий из основополагающего принципа учёта, критерия необходимости учёта, приближенных зависимостей для получения информации о влиянии температурного удара на динамику малого космического аппарата и совокупности правил применения основополагающего принципа, обеспечивающих получение адекватной оценки путём выявления границ применимости приближенных зависимостей для конкретной решаемой задачи.

Представлена система управления угловым движением малого космического аппарата на основе комплекса управляющих двигателей-маховиков, в которой предлагается изменить классическую схему компоновки, повернув резервный двигатель-маховик ближе к той оси, по которой создаётся возмущающий момент от температурного удара. Таким образом, влияние температурного удара предлагается парировать за счёт резервного двигателя-маховика, а не за счёт основных.

Даны рекомендации по использованию метода учёта влияния температурного удара для корректного моделирования динамики углового движения малого космического аппарата. Проведено численное моделирование для малого космического аппарата с одной и двумя панелями солнечных батарей. Результаты моделирования показывают значимость влияния температурного удара для эффективного выполнения целевых задач высокоточного дистанционного зондирования Земли из космоса.

Научная новизна результатов работы заключается в следующих положениях:

- построении модели углового движения малого космического аппарата, учитывающей возмущения от температурного удара;
- разработке метода учёта влияния возмущения от температурного удара на угловое движение малого космического аппарата;
- компоновке двигателей комплекса управляющих двигателей-маховиков, позволяющей компенсировать возмущения от температурного удара;
- оценке возмущений от температурного удара;
- выводе приближенных аналитических зависимостей для компонентов вектора перемещений и поля температур панели солнечной батареи малого космического аппарата;
- создании критериев учёта двумерности задачи теплопроводности.

Достоверность результатов диссертационной работы подтверждается корректным применением известных законов механики, термодинамики и теплопередачи, логичностью выводов и рассуждений, адекватностью упрощающих предположений, а также верификацией полученных результатов с помощью численного моделирования и их валидацией по результатам натурных экспериментов других авторов.

Теоретическая и практическая ценность работы определяется полученными приближенными аналитическими аппроксимациями поля температур и прогибов точек панели солнечной батареи малого космического аппарата при температурном ударе в рамках одномерной и двумерной моделей теплопроводности. На их основе построена модель углового движения малого космического аппарата, разработан метод учёта влияния температурного удара на это движение и предложена система управления угловым движением малого космического аппарата, позволяющая нивелировать возмущения от температурного удара

Апробация и публикация основных результатов работы проводилась соискателем на **восьми** конференциях различного уровня и в 22 научных изданиях из перечня ВАК. 16 статей опубликованы в журналах, индексируемых Web of Science и Scopus, в том числе,

первого и второго квартилей. Получены два свидетельства государственной регистрации программы для ЭВМ.

Замечания к диссертационной работе и автореферату

1 В формуле (2.3) приведены U и I – рабочие напряжение и сила тока бортовой сети. В работе не указано, как вычислялись эти характеристики при численном моделировании. Учитывался ли при этом переходный процесс?

2 В работе не приведена численная оценка снижения возможностей резервного двигателя-маховика по дублированию основных двигателей-маховиков при его повороте для компенсации возмущений от температурного удара в предлагаемой схеме системы управления угловым движением.

3 Некоторые рисунки (например, 4.8 и 4.9) имеют дублирующуюся нумерацию.

Однако отмеченные замечания носят непринципиальный характер и не влияют на положительную оценку диссертации Сердаковой В.В.

Заключение о соответствии диссертации критериям, установленным Положением о порядке присуждения учёных степеней

Диссертация Сердаковой Валерии Владимировны на тему «Исследование движения малого космического аппарата с учётом вызванных температурным ударом возмущений» является научно-квалификационной работой, в которой на базе проведённых автором исследований содержится решение научной задачи повышения эффективности выполнения целевых задач малым космическим аппаратом путём учёта влияния температурного удара посредством предложенной в работе системы управления малым космическим аппаратом на основе комплекса управляющих двигателей-маховиков.

Тема и результаты исследования соответствуют паспорту специальности 1.1.7 – Теоретическая механика, динамика машин (технические науки), в частности, пп. 1, 10, 13, 14, 15. Автореферат диссертации полностью отражает её содержание и соответствует п. 25 Положения о порядке присуждения учёных степеней.

Диссертация Сердаковой Валерии Владимировны является завершённым научным исследованием, обладающим внутренним единством и не имеющим противоречий, содержит новые научные результаты, имеющие значение для развития космической техники, в частности, малых космических аппаратов.

Диссертационная работа Сердаковой Валерии Владимировны на тему: «Исследование движения малого космического аппарата с учётом вызванных температурным ударом возмущений», представленная на соискание учёной степени кандидата технических наук по специальности 1.1.7 – Теоретическая механика, динамика машин (технические науки), соответствует критериям 9-14 Положения о порядке

присуждения учёных степеней, утверждённого постановление Правительства РФ № 842 от 24.09.2013 (в редакции от 16.10.2024). Автор диссертации Сердакова В.В. заслуживает присуждения ей учёной степени кандидата технических наук по специальности 1.1.7 – Теоретическая механика, динамика машин (технические науки).

Заведующий кафедрой
Автоматизации и управления
Пензенского государственного
технологического университета, д.т.н.



А.Н. Бормотов

Сведения об оппоненте:

1. Ф.И.О.: Бормотов Алексей Николаевич,
2. Организация: ФГБОУ ВО «Пензенский государственный технологический университет».
3. Адрес организации: 440039, г. Пенза, проезд Байдукова/ул. Гагарина, д.1а/11,
4. Служебный телефон: +7 8412 49–54–41, факс: +7 8412 49–60–86
5. E-mail: aleks21618@yandex.ru
6. Должность: заведующий кафедрой Автоматизации и управления, профессор

Подпись Бормотова Алексея Николаевича заверяю.

Ученый секретарь ученого совета
ФГБОУ ВО «Пензенский государственный
технологический университет»



О.А. Петрунина

24.10.2025