

На правах рукописи



Сердакова Валерия Владимировна

**ИССЛЕДОВАНИЕ ДВИЖЕНИЯ МАЛОГО КОСМИЧЕСКОГО
АППАРАТА С УЧЁТОМ ВЫЗВАННЫХ ТЕМПЕРАТУРНЫМ УДАРОМ
ВОЗМУЩЕНИЙ**

1.1.7 – Теоретическая механика, динамика машин
(технические науки)

**Автореферат
диссертации на соискание учёной степени
кандидата технических наук**

Самара - 2025

Работа выполнена в федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королева» на кафедре высшей математики.

Научный руководитель:

Седельников Андрей Валерьевич, доктор технических наук, доцент, профессор кафедры теоретической механики федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королева».

Официальные оппоненты:

Бормотов Алексей Николаевич, доктор технических наук, доцент, заведующий кафедрой «Автоматизация и управление» федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Пензенский государственный технологический университет»;

Масловская Анна Геннадьевна, доктор физико-математических наук, профессор, профессор центра образовательных программ топ-уровня в сфере искусственного интеллекта факультета компьютерных и инженерных наук автономной некоммерческой организации высшего образования «Университет Иннополис».

Ведущая организация:

«Федеральный исследовательский центр Институт прикладной физики им. А.В. Гапонова-Грехова Российской академии наук», г. Нижний Новгород.

Защита состоится «23» декабря 2025 г. в 12.00 часов на заседании диссертационного совета 24.1.075.02, созданного на базе на базе Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института машиноведения им. А.А. Благонравова Российской академии наук (ИМАШ РАН) по адресу: 119334, г. Москва, ул. Бардина 4.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ИМАШ РАН и на сайте <http://imash.ru/>.

Отзывы на автореферат в двух экземплярах, заверенных гербовой печатью учреждения (организации), просьба направлять по адресу: 119334, г. Москва, ул. Бардина, д. 4, Филиал ИМАШ РАН НЦ НВМТ РАН, учёному секретарю диссертационного совета 24.1.075.02.

Автореферат разослан «__» _____ 2025 г.

Учёный секретарь
диссертационного совета,
кандидат технических наук



Гранова Галина Николаевна

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность исследования движения малого космического аппарата (МКА) при учёте воздействия различного рода возмущений диктуется необходимостью удовлетворения возрастающих требований к качеству выполнения им целевых задач. Так, например, для решения задач дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) требуется получение спутниковых изображений высокого разрешения при столь же высокой точности ориентации относительно инспектируемого объекта. Это накладывает ограничения на динамику углового движения МКА ДЗЗ в момент съёмки. Для МКА технологического назначения (ТН) важным фактором являются ограничения по микроускорениям. Без их выполнения проведение гравитационно-чувствительных экспериментов становится нецелесообразным. Поэтому развитие современных МКА и эффективное их применение требует изучения и переосмысления значимости влияния возмущающих факторов на движение МКА. Без этого трудно говорить о качественном выполнении МКА целевых задач, например, в области космических технологий или ДЗЗ из космоса. Одним из таких возмущений является температурный удар упругих элементов МКА, возникающий при погружении и выходе МКА из тени Земли.

Актуальность настоящей диссертации заключается в том, что в ней представлены оценки возмущений от температурного удара для МКА с симметричной и несимметричной схемой расположения панелей солнечных батарей (ПСБ) с помощью полученных в работе приближенных аналитических зависимостей перемещений точек пластины в рамках одномерной и двумерной задач теплопроводности. Это позволяет учитывать температурный удар при моделировании движения МКА и повышать качество и эффективность выполнения целевых задач, для которых значимо влияние температурного удара.

Диссертация является научно-квалификационной работой, в которой содержится решение научной задачи учёта возмущений от температурного удара МКА, имеющей значение для развития динамики углового движения МКА, расширения областей использования космической техники и повышения эффективности выполнения, стоящих перед ней целевых задач.

Своевременность проводимых исследований обусловлена тем, что, несмотря на бурное развитие МКА в последние годы, до сих пор не реализовано ни одного проекта МКА ТН. Массовая доля упругих элементов (прежде всего, ПСБ) в общей массе МКА может существенно превышать эту долю для космических аппаратов (КА) других классов. Поэтому относительное движение точек ПСБ вызывает значимое возмущение движения корпуса МКА. Это касается и температурного удара. Без исследования влияния температурного удара на движение МКА существенный прогресс в области применения МКА для нужд космических технологий вызывает большие сомнения.

Степень разработанности темы. Теоретические исследования задач теплопроводности для полубесконечных тел датированы первой половиной прошлого века. В этой связи следует выделить работы **Н.Н. Лебедева, В.И. Даниловской, Э. Мелана, Х. Паркуса, Р.Д. Миндлина**. В этих и ряде других работ были поставлены и решены первая и вторая начально-краевые задачи теплопроводности, допускающие получение решение методом разделения Фурье или с помощью функций Грина. В ряде работ были поставлены и задачи температурного удара. Большую роль в описании различных моделей температурного удара сыграли работы **Э.М. Карташова, В.А. Кудинова, Б.А. Люкшина**. Однако большинство теоретических исследований касаются

идеализированных объектов и условий температурного удара и мало подходят для практического использования в области космической техники.

Прикладные исследования в области оценки влияния температурного удара на движение КА или качество выполнения им целевых задач можно найти в работах Дж. Д. Джонсона, З. Шена, А.В. Седельникова и других. Проанализировано воздействие температурного удара на точность ориентации конкретных КА, оценены колебания ПСБ, возникающие из-за температурного удара, а также решён ряд других частных задач, как правило, с помощью компьютерных моделей. Однако вопрос получения приближенных аналитических решений для корректного описания влияния температурного удара ПСБ на движение МКА проработан недостаточно детально.

Современные задачи, связанные с повышением точности ориентации МКА при выполнении задач ДЗЗ, снижения вибраций при реализации гравитационно-чувствительных процессов на борту МКА и т.д., требуют более глубоких и детальных исследований температурного удара ПСБ МКА в реальных условиях космического пространства.

Целью диссертации является повышение эффективности выполнения целевых задач малым космическим аппаратом путём учёта влияния температурного удара его упругих элементов.

Объектом исследования является процесс динамики движения точек панели солнечной батареи космического аппарата при температурном ударе.

Предметом исследования является малый космический аппарат с панелями солнечных батарей, подверженных действию температурного удара.

Для достижения поставленной в диссертационной работе цели необходимо решить следующие **основные задачи**.

1 Моделирование динамики углового движения МКА с упругими элементами при воздействии температурного удара.

2 Разработка метода учёта влияния движения точек ПСБ в процессе температурного удара на динамику МКА.

3 Создание математической модели движения точек ПСБ в рамках одномерной модели теплопроводности для описания возмущений, действующих на МКА в результате температурного удара.

4 Создание математической модели движения точек ПСБ в рамках двумерной модели теплопроводности для описания возмущений, действующих на МКА 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 ПСБ на динамику МКА для симметричной и несимметричной схем ПСБ.

При решении этих задач получены **результаты, обладающие научной новизной**.

1 Построена модель движения МКА, учитывающая возмущения от температурного удара.

2 Разработан метод учёта влияния возмущения от температурного удара на динамику движения МКА, позволяющий проводить его корректный учёт для случаев, когда его влияние на движение МКА является значимым.

3 Предложена система управления угловым движением МКА на основе комплекса управляющих двигателей-маховиков (КУДМ), нивелирующая

негативные последствия температурного удара на качество решения целевых задач.

4 Проведена оценка возмущений от температурного удара для МКА с симметричной и несимметричной схемой расположения ПСБ, которая позволяет построить корректную модель движения МКА.

5 Получены приближённые аналитические зависимости для компонентов вектора перемещений, а также поля температур ПСБ МКА, позволяющие оценивать максимальную значимость влияния температурного удара на движение МКА.

6 Созданы критерии учёта двумерности задачи теплопроводности, позволяющие корректно применять приближённые аналитические зависимости при моделировании углового движения МКА.

На защиту выносятся следующие положения:

1 Модель движения МКА с учётом возмущений от температурного удара.

2 Метод учёта влияния температурного удара на динамику движения МКА.

3 Система управления угловым движением МКА на основе КУДМ.

4 Приближённые аналитические зависимости компонентов вектора перемещений точек ПСБ МКА при температурном ударе в рамках одномерной задачи для оценки возмущений, действующих на МКА.

5 Приближённые аналитические зависимости компонентов вектора перемещений точек ПСБ МКА при температурном ударе в рамках двумерной задачи для оценки возмущений, действующих на МКА.

6 Критерии учёта двумерности при описании движения точек ПСБ МКА, подверженной температурному удару.

7 Результаты численного моделирования возмущающих факторов от температурного удара, влияющих на динамику движения МКА.

Область исследования. Основные положения диссертации соответствуют паспорту специальности научных работников 1.1.7 Теоретическая механика, динамика машин и охватывает следующие направления исследований:

п. 1 «Классическая механика и аналитическая динамика» в части математической формализации силовых возмущающих факторов, влияющих на движение МКА при температурном ударе в рамках классической механики;

п. 10 «Динамика летательных аппаратов и космических конструкций» в части построения метода учёта влияния температурного удара ПСБ на динамику МКА;

п. 13 «Динамика систем, состоящих из абсолютно твёрдых и деформируемых тел, в том числе машин, приборов и конструкций» в части исследования динамики движения МКА, состоящего из твёрдого тела и упругих ПСБ;

п. 14 «Математическое и компьютерное моделирование кинематики и динамики механических систем, в том числе машин, приборов и их элементов при динамических, статических, тепловых и других видах воздействий» в части проведения математического и компьютерного моделирования динамики МКА как механической системы и ПСБ как элемента МКА в результате температурного удара как теплового воздействия;

п. 15 «Экспериментальное исследование динамики систем тел, в том числе летательных аппаратов, машин, приборов и конструкций» в части использования экспериментальных данных для валидации зависимостей.

Теоретическая значимость диссертационной работы заключается в полученных приближённых аналитических оценках возмущений от температурного удара на основе зависимостей компонентов вектора

перемещений в рамках одномерной и двумерной моделей теплопроводности.

Практическая значимость диссертационной работы состоит в создании системы управления угловым движением МКА с учётом возмущений от температурного удара, позволяющей нивелировать эти возмущения. На разработанные программные комплексы были получены два патента на программу для ЭВМ. Разработаны критерии учёта двумерности модели, позволяющие корректно описывать различные ситуации воздействия температурного удара на тонкую пластину. Разработан метод учёта влияния температурного удара на динамику движения МКА, позволяющий вырабатывать рекомендации по управлению движением МКА. Получен акт внедрения разработанного метода и приближенных аналитических зависимостей в практику проектирования перспективных МКА АО РКЦ «Прогресс».

Методы исследования включают в себя известные методы классической механики, теории упругости, термодинамики и теплопередачи; построения начально-краевых задач теплопроводности и термоупругости; проведения вычислительного эксперимента.

Достоверность полученных в работе результатов достигается корректностью применения известных базовых законов и сравнением результатов с экспериментальными данными и результатами, полученными другими авторами. **Результаты работы апробированы** на 8 международных и Всероссийских конференциях, опубликованы в 22 научных изданиях из перечня ВАК, в том числе – 16 работ в ведущих мировых журналах, входящих в наукометрические базы Web of Science и Scopus (две квартиля Q1 и пять квартиля Q2). Получено два свидетельства о государственной регистрации программы для ЭВМ.

Работа выполнена при поддержке грантов Минобрнауки России на выполнение крупного научного проекта (соглашение № 075-15-2024-558 от 25.04.24) и Министерства науки и высшего образования РФ в рамках госзадания (Проект FSSS-2023-0007).

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** отмечена актуальность исследования динамики движения МКА с упругими элементами с учётом возмущений для эффективного решения современных задач, стоящих перед МКА. При этом указано, что одним из таких возмущений является температурный удар упругих элементов МКА, прежде всего ПСБ. Движение точек ПСБ при температурном ударе может оказать существенное влияние на динамику углового движения МКА при решении задач ДЗЗ или реализации гравитационно-чувствительных процессов. Проанализирована степень разработанности проблемы учёта температурного удара при моделировании движения МКА на современном этапе, показана необходимость исследования динамики движения точек ПСБ при температурном ударе для повышения эффективности использования МКА при решении им целевых задач. Сформулирована цель диссертационной работы и перечислены основные задачи, решение которых позволяет её достичь.

В **первой главе** рассматривается актуальность и современное состояние проблемы температурного удара упругих элементов МКА, а также её важность для развития космической техники. Необходимо исследование движения МКА с учётом температурного удара, поскольку связанные с ним возмущения:

- для МКА ТН могут нарушать требования по микроускорениям;

- для МКА ДЗЗ могут существенно влиять ориентацию МКА и параметры его углового движения;
- при использовании ПСБ типа ROSA снижают управляемость МКА.

На рисунке 1 представлены схемы орбитального движения МКА и относительного движения ПСБ в результате температурного удара. Уравнения движения центра масс МКА в связанной системе координат (ССК) имеют вид:

$$\begin{cases} m \frac{d^2 x}{dt^2} = F_x^e + \Phi_x^{ССК} + \sum_{i=1}^N \Phi_{xi}; \\ m \frac{d^2 y}{dt^2} = F_y^e + \Phi_y^{ССК} + \sum_{i=1}^N \Phi_{yi}; \\ m \frac{d^2 z}{dt^2} = F_z^e + \Phi_z^{ССК} + \sum_{i=1}^N \Phi_{zi}, \end{cases} \quad (1)$$

где $\vec{F}^e(F_x^e, F_y^e, F_z^e)$ – главный вектор внешних сил, действующих на МКА, и его проекции в ССК; $\vec{\Phi}^{ССК}(\Phi_x^{ССК}, \Phi_y^{ССК}, \Phi_z^{ССК})$ – вектор сил инерции, вызванных с неинерциальностью ССК; $\vec{\Phi}_i(\Phi_{xi}, \Phi_{yi}, \Phi_{zi})$ – вектор сил инерции i -го упругого элемента, вызванных его ускоренным относительным движением.

Динамические уравнения Эйлера в ССК с учётом изменения компонентов тензора инерции МКА будут иметь вид:

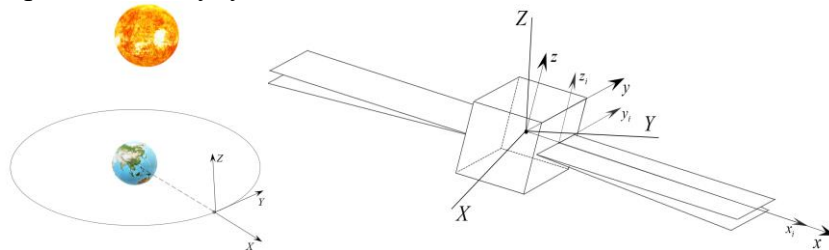


Рисунок 1 – Движение МКА по орбите ИСЗ Земли. Орбитальная (XYZ), связанная (xyz) и местная (x_{yi}z_i) системы координат

$$\begin{cases} I_{xx}\dot{\omega}_x + \dot{I}_{xx}\omega_x - I_{xy}\dot{\omega}_y - \dot{I}_{xy}\omega_y - I_{xz}\dot{\omega}_z - \dot{I}_{xz}\omega_z + \omega_y(I_{zz}\omega_z - I_{zx}\omega_x - I_{yz}\omega_y) - \omega_z(I_{yy}\omega_y - I_{yx}\omega_x - I_{yz}\omega_z) = M_x \\ I_{yy}\dot{\omega}_y + \dot{I}_{yy}\omega_y - I_{xy}\dot{\omega}_x - \dot{I}_{xy}\omega_x - I_{yz}\dot{\omega}_z - \dot{I}_{yz}\omega_z + \omega_z(I_{xx}\omega_x - I_{xy}\omega_y - I_{xz}\omega_z) - \omega_x(I_{zz}\omega_z - I_{zx}\omega_x - I_{yz}\omega_y) = M_y \\ I_{zz}\dot{\omega}_z + \dot{I}_{zz}\omega_z - I_{xz}\dot{\omega}_x - \dot{I}_{xz}\omega_x - I_{yz}\dot{\omega}_y - \dot{I}_{yz}\omega_y + \omega_x(I_{yy}\omega_y - I_{yx}\omega_x - I_{yz}\omega_z) - \omega_y(I_{xx}\omega_x - I_{xy}\omega_y - I_{xz}\omega_z) = M_z \end{cases} \quad (2)$$

где $I_{xx}...I_{zz}$ – компоненты тензора инерции МКА в ССК;

$\vec{M}(M_x, M_y, M_z) = \vec{M}^e + \vec{M}^{cont} + \vec{M}(\vec{\Phi}^{ССК}) + \sum_{i=1}^n \vec{M}(\vec{\Phi}_i)$ – вектор возмущающих моментов

относительно центра масс МКА (в правой части соответственно моменты внешних сил, управления и сил инерции, записанных в системе (1)).

Для практического использования модели (1)-(2) необходима оценка возмущающих факторов от температурного удара. Для этого следует:

- решить задачу теплопроводности и определить динамическое поле температур;
 - решить соответствующую задачу термоупругости и определить динамику точек ПСБ при температурном ударе;
 - определить силы инерции, возникающие при ускоренном движении ПСБ;
 - провести анализ движения МКА, состоящего из твёрдого тела (корпус) и упругих тел (ПСБ) с учётом возмущающих факторов от температурного удара.
- В главе дано краткое описание основных задач диссертации, гарантирующих достижение поставленной в работе цели.

Во **второй главе** исследовано движение точек ПСБ и построена математическая модель этого движения для одномерной модели теплопроводности при

упрощающих предположениях:

- телом, температурное поле которого моделируется при решении поставленных задач, является тонкая однородная пластина;
- граничными условиями для задачи термоупругости являются жёстко заделанный одним краем и свободные три других края пластины;
- в момент наступления температурного удара пластина имеет плоскую форму;
- направление падающего потока солнечного излучения в момент температурного удара перпендикулярно поверхности пластины;
- поток солнечного излучения считается равномерным и стационарным, а его мощность – равной максимальному значению на уровне орбиты Земли;
- собственные колебания ПСБ не влияют на их температурное поле;
- все теплофизические свойства ПСБ предполагаются однородными и одинаковыми во всём диапазоне температур;
- для вывода уравнений модели используется закон Фурье;
- начальное поле распределения температур в ПСБ считается однородным;
- толщина ПСБ пренебрежимо мала по сравнению с её длиной и шириной;
- теплообмен через боковые поверхности пластины пренебрежимо мал;
- тепловые, механические и электрические процессы, протекающие в ПСБ, не оказывают друг на друга взаимного влияния за исключением влияния температурного расширения на процесс деформирования ПСБ;
- ПСБ мгновенно выходит на штатную мощность выработки электроэнергии после выхода МКА из тени Земли.

С учётом упрощений поставлена начально-краевая задача теплопроводности:

$$\frac{\partial T(z, t)}{\partial t} = a \frac{\partial^2 T(z, t)}{\partial z^2}, \quad 0 \leq z \leq h, \quad t > 0, \quad (3)$$

$$\lambda \frac{\partial T(0, t)}{\partial z} = -e\Theta [T(0, t)^4 - T_c^4], \quad z = 0, \quad t > 0, \quad (4)$$

$$\lambda \frac{\partial T(h, t)}{\partial z} = Q - \frac{UI}{lb} - e\Theta [T(h, t)^4 - T_c^4], \quad z = h, \quad t > 0, \quad (5)$$

$$T(z, 0) = T_0, \quad 0 \leq z \leq h, \quad t = 0, \quad (6)$$

где $T(z, t)$ – температура пластины; t – время; $a = \lambda / c\rho$ – коэффициент температуропроводности; λ – коэффициент теплопроводности; c – удельная теплоёмкость; ρ – плотность; l , b и h – соответственно длина, ширина и толщина пластины; e – степень черноты материала пластины; Θ – постоянная Стефана-Больцмана; T_c – температура окружающей пластину среды; Q – падающий тепловой поток (рисунок 2); T_0 – начальная температура, одинаковая для всех точек пластины; U и I – рабочие напряжение и сила тока бортовой сети.

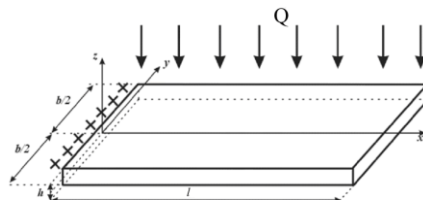


Рисунок 2 – Схема температурного удара однородной пластины

Вектор перемещений точек пластины $\vec{u}(u_x, u_y, u_z)$ описывается следующим образом: $u_x = 0$, $u_y = u_y(x, y, t)$, $u_z = u_z(x, t)$. Это является дополнительным упрощением при решении поставленной задачи.

Начально-краевой задаче (1)-(4) соответствует уравнение термоупругости:

$$D \frac{\partial^4 u_z(x, t)}{\partial x^4} + \rho h \frac{\partial^2 u_z(x, t)}{\partial t^2} = -2\mu\alpha \int_0^h \left[2 \frac{\partial T(z, t)}{\partial z} + z \frac{\partial^2 T(z, t)}{\partial z^2} \right] dz, \quad 0 \leq x \leq l, t > 0, \quad (7)$$

где D – цилиндрическая жёсткость пластины на изгиб; μ – коэффициент Ламэ; α – коэффициент линейного расширения материала пластины.

Граничные условия имеют вид:

$$\begin{cases} u_z(0, t) = 0, x = 0, t > 0; \\ \frac{\partial u_z(x, t)}{\partial x} = 0, x = 0, t > 0. \end{cases} \quad (8) \quad \begin{cases} \frac{\partial^2 u_z(x, t)}{\partial x^2} = 0, x = l, t > 0; \\ \frac{\partial^3 u_z(x, t)}{\partial x^3} = 0, x = l, t > 0. \end{cases} \quad (9)$$

Начальное условие в соответствие с ранее сделанными допущениями:

$$u_z(x, 0) = 0, \quad 0 \leq x \leq l, \quad t = 0. \quad (10)$$

Для получения уравнения по компоненту вектора перемещений u_y рассмотрим равновесное состояние ($t = \infty$) пластины после температурного удара:

$$\begin{cases} \frac{\partial^2 u_y(x, y, t)}{\partial x \partial y} = 0, \quad 0 \leq x \leq l, \quad 0 \leq y \leq \frac{b}{2}, \quad t = \infty; \\ \frac{3(1-\nu)}{1+\nu} \frac{\partial^2 u_y(x, y, t)}{\partial y^2} + \frac{3(1-2\nu)}{2(1+\nu)} \frac{\partial^2 u_y(x, y, t)}{\partial x^2} = 0, \quad 0 \leq x \leq l, \quad 0 \leq y \leq \frac{b}{2}, \quad t = \infty; \\ \frac{3(1-2\nu)}{2(1+\nu)} \frac{\partial^2 u_z(x, t)}{\partial x^2} = \alpha \frac{\partial T(z, t)}{\partial z}, \quad 0 \leq x \leq l, \quad 0 \leq y \leq \frac{b}{2}, \quad t = \infty. \end{cases} \quad (11)$$

Для удовлетворения первого уравнения (11) представим:

$$u_y(x, y, t) = u_{1y}(x, t) + y u_{3y}(t). \quad (12)$$

Добавим инерционный член во второе уравнение (11), согласно принципу Даламбера, тогда оно с учётом инерционного члена для бесконечно малого элемента пластины объёмом $0,5hbdx$ будет иметь вид:

$$\frac{3(1-2\nu)}{2(1+\nu)} \frac{\partial^3 u_{1y}(x, t)}{\partial x^3} + \frac{6\rho(1-\nu^2)}{Eh^2} \frac{\partial^2 u_{1y}(x, t)}{\partial t^2} b = 0, \quad 0 \leq x \leq l, \quad t > 0, \quad (13)$$

где E – модуль Юнга.

На основе анализа одномерной задачи теплопроводности было предложено приближенное решение для температуры пластины и получены приближённые аналитические зависимости для компонентов вектора перемещений:

$$T(z, t) = Cz \frac{t}{t + \beta} + T_0, \quad 0 \leq z \leq h, \quad t > 0. \quad (14)$$

$$u_z(x, t) = \frac{Al^4 t}{t + \beta} \left(\frac{x^4}{l^4} - 4 \frac{x^3}{l^3} + 6 \frac{x^2}{l^2} \right), \quad 0 \leq x \leq l, \quad t > 0. \quad (15)$$

$$u_y(x, y, t) = \alpha [T(0, t) - T_0] \left[y - \frac{b}{2} \left(1 - \frac{x^2}{l^2} \right)^4 \right], \quad 0 \leq x \leq l, \quad 0 \leq y \leq \frac{b}{2}, \quad t > 0. \quad (16)$$

Выражение (14) представляет собой новую приближенную форму решения уравнения одномерной задачи (3)-(6) с использованием разложения:

$$T_n(z, t) = \sum_{i=0}^n \xi_i(t) z^i, \quad \text{где } n - \text{число учитываемых членов (в работе } n = 3); \quad \xi_i(t) -$$

некоторые функции времени. Решения (15) и (16) удовлетворяют начальным и граничным условиям (8)-(10), используют (14) и получены впервые.

Проведено численное моделирование в пакете ANSYS для пластины из материала МА-2 при равномерном начальном поле температур $T_0 = 200 \text{ K}$ и постоянном тепловом потоке $Q = 1400 \text{ Bm/(м} \cdot \text{K)}$. Результаты представлены на рисунке 3. Сравнение (14) с численным решением в пакете ANSYS приведено

на рисунке 4, решения (15) и (16) для этого случая показаны на рисунке 5.

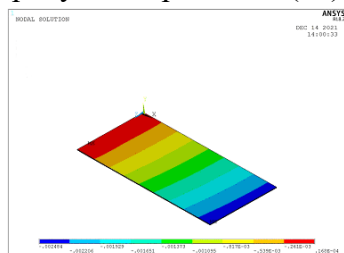


Рисунок 3 – Модель деформированного состояния пластины в результате температурного удара

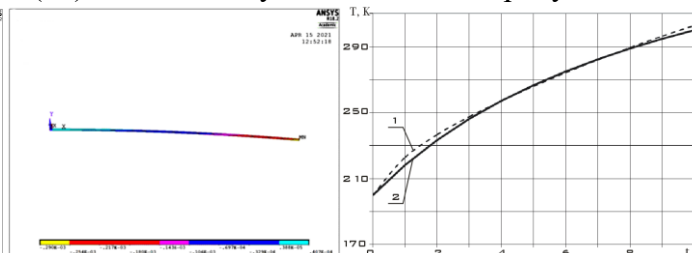


Рисунок 4 – Динамика температур поверхностного слоя пластины ($z = h$): 1 – численная модель; 2 – по формуле (14) при $C = 200 \text{ K/m}$, $\beta = 1 \text{ s}$

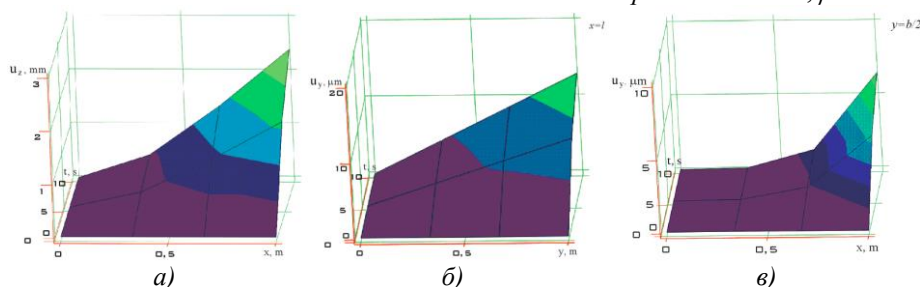


Рисунок 5 – Зависимость компонентов вектора перемещений:
а) $u_z(x, t)$ для $A=10^{-4} \text{ м}^{-3}$; б) $u_y(x=l, y, t)$; в) $u_y(x, y=b/2, t)$

Поставленная и решённая в данной главе начально-краевая задача одномерной теплопроводности и соответствующая ей задача термоупругости представляют собой самый опасный случай влияния температурного удара на динамику МКА. Поэтому её значение для оценки влияния температурного удара достаточно высоко с точки зрения практической значимости.

В третьей главе для исследования углового движения МКА с учётом температурного удара построена математическая модель движения точек ПСБ в рамках двумерной модели теплопроводности. Двумерность задачи связана с начальным прогибом ПСБ в момент температурного удара, например, за счёт их собственных колебаний (рисунок 6). В работе это определяется как статический учёт колебаний ПСБ. Считается, что температурный удар существенно более динамичное явление, чем собственные колебания. Поэтому в таком смысле задача носит статический характер и не учитывает динамику самих колебаний.

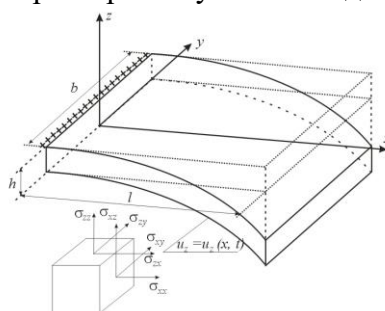


Рисунок 6 – Схема упругого элемента в момент температурного удара

Для корректного учёта температурного удара сформулированы критерии перехода из одномерной постановки задачи в двумерную. Эти критерии определяют значимость погрешностей одномерной постановки из-за предположения о плоской форме ПСБ в момент температурного удара и основаны на разных подходах:

– геометрический подход:

$$\theta_{z0}(x, t) = \frac{\partial u_{z0}(x, t)}{\partial x} \leq \theta_{z0}^{kp}, \quad 0 \leq x \leq l, \quad t = 0, \quad (17)$$

где $\theta_{z0}(x, t)$ – угол наклона касательной к искривлённой поверхности пластины в плоскости xz (рисунок 6); θ_{z0}^{kp} – критическое значение угла, нарушающее справедливость предположения о перпендикулярности направления потока солнечного излучения поверхности пластины в момент температурного удара (определяет значимость отличия формы ПСБ в момент удара от плоской);
– *энергетический подход*:

$$\frac{Q}{2l} \int_0^l \theta_{z0}^2(x, 0) dx \leq \Delta \bar{q}_{kp}, \quad (18)$$

где $\Delta \bar{q}_{kp}$ – критическое значение, нарушающее одномерность в распространении тепла внутри пластины (определяет величину теплового потока, которым пренебрегают в одномерной постановке);
– *конструктивный подход* (оценка микроускорений от температурного удара):

$$\left| \frac{\alpha E b}{m_0} \int_0^l dx \int_{-h/2}^{h/2} (T_1(z, t) - T_2(x, z, t)) dz \right| < \Delta w_{inst}, \quad (19)$$

где m_0 – общая масса МКА, включая ПСБ; $T_1(z, t)$ и $T_2(x, z, t)$ – соответственно одномерная и двумерная оценки температуры ПСБ; Δw_{inst} – инструментальная погрешность измерений или косвенная погрешность оценки (определяет разность оценки микроускорений при одномерной и двумерной постановках). Разработанные критерии способствуют повышению эффективности выполнения МКА его целевых задач путём корректности учёта температурного удара (правильный выбор постановки) в зависимости от характера этих задач. Двумерная постановка задачи термоупругости имеет вид:

$$\begin{cases} \frac{\partial T(x, z, t)}{\partial t} = a \left(\frac{\partial^2 T(x, z, t)}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T(x, z, t)}{\partial z^2} \right), \quad 0 \leq x \leq l, \quad h \leq z \leq 0, \quad t > 0; \\ \left(\lambda \frac{\partial T(x, h, t)}{\partial n} \right) = Q_0 \cdot \cos \left(\frac{du_{z0}(x, 0)}{dx} \right) - \frac{Ul}{lb} - e\Theta(T^4(x, h, t) - T_c^4), \quad 0 \leq x \leq l, \quad z = h, \quad t > 0; \\ \left(\lambda \frac{\partial T(x, 0, t)}{\partial n} \right) = -e\Theta(T^4(x, 0, t) - T_c^4), \quad 0 \leq x \leq l, \quad z = 0, \quad t > 0; \\ T(x, z, 0) = T_0 = const, \end{cases} \quad (20)$$

где $\vec{n}$ – вектор нормали к участку поверхности пластины.

Начально-краевой задаче (20) соответствует уравнение термоупругости:

$$D \frac{\partial^4 u_z(x, t)}{\partial x^4} + \rho h \frac{\partial^2 u_z(x, t)}{\partial t^2} = -2\mu\alpha \int_0^h \left[2 \frac{\partial T(x, z, t)}{\partial z} + z \frac{\partial^2 T(x, z, t)}{\partial z^2} \right] dz + \frac{\partial^2 u_{z0}(x, 0)}{\partial x^2} \sigma_{xz}, \quad (21)$$

где σ_{xz} – соответствующий компонент тензора напряжений (рисунок 6).

Граничные условия (8) и (9) не меняются, а начальное – (10) принимает вид:

$$u_z(x, 0) = u_{z0}(x, 0), \quad 0 \leq x \leq l, \quad t = 0, \quad (22)$$

где функция $u_{z0}(x, 0)$ должна удовлетворять граничным условиям (8) и (9).

Показано, что замена выражения для поля температур (14) на следующее:

$$T(x, z, t) = z \cdot f_1(t) - M \sin \eta x + T_0, \quad 0 \leq x \leq l, \quad 0 \leq z \leq h, \quad t > 0, \quad (23)$$

(где M – некоторая положительная константа а η – некоторый малый параметр, позволяющий представлять $\sin \eta x \approx \eta x$, $0 \leq x \leq l/2$) оставляет в силе решение одномерной задачи с учётом начального прогиба:

$$u_z(x, t) = \frac{Al^4 t}{t + \beta} \left(\frac{x^4}{l^4} - 4 \frac{x^3}{l^3} + 6 \frac{x^2}{l^2} \right) + u_{z0}(x, 0), \quad 0 \leq x \leq l, \quad t > 0. \quad (24)$$

Для компонента $u_y(x, y, t)$ учёт двумерности влечёт более серьёзные изменения. Уравнения (11) принимают следующий вид:

$$\begin{cases} \frac{\partial^2 u_y(x, y, t)}{\partial x \partial y} = \alpha \frac{\partial T(x, z, t)}{\partial x}, \quad 0 \leq x \leq l, \quad 0 \leq y \leq \frac{b}{2}, \quad t = \infty; \\ \frac{3(1-\nu)}{1+\nu} \frac{\partial^2 u_y(x, y, t)}{\partial y^2} + \frac{3(1-2\nu)}{2(1+\nu)} \frac{\partial^2 u_y(x, y, t)}{\partial x^2} = 0, \quad 0 \leq x \leq l, \quad 0 \leq y \leq \frac{b}{2}, \quad t = \infty; \\ \frac{3(1-2\nu)}{2(1+\nu)} \frac{\partial^2 u_z(x, t)}{\partial x^2} = \alpha \frac{\partial T(x, z, t)}{\partial z}, \quad 0 \leq x \leq l, \quad 0 \leq y \leq \frac{b}{2}, \quad t = \infty. \end{cases} \quad (25)$$

Разложение (12) больше не удовлетворяет первому уравнению (25). Используем:

$$u_y(x, y, t) = u_{4y}(x, t)y. \quad (26)$$

Тогда второе уравнение с учётом сил инерции вместо (13) примет вид:

$$\frac{3(1-2\nu)}{2(1+\nu)} \frac{\partial^3 u_y(x, y, t)}{\partial x^3} + \frac{6\rho(1-\nu^2)}{Eh^2} \frac{\partial^2 u_y(x, y, t)}{\partial t^2} b = 0, \quad 0 \leq x \leq l, \quad 0 \leq y \leq \frac{b}{2}, \quad t > 0. \quad (27)$$

При этом граничные и начальные условия остаются в силе. Найдено приближенное аналитическое решение для этого случая в виде:

$$u_y(x, y, t) = - \left[\frac{Eh^2(1-2\nu)\alpha M \eta^2}{8\rho(1-\nu^2)(1+\nu)b} \cos \eta x t^2 + \alpha M \sin \eta x \right] y, \quad 0 \leq x \leq l, \quad 0 < y \leq \frac{b}{2}, \quad t > 0. \quad (28)$$

Проведено численное моделирование температурного удара в рамках двумерной модели в пакете ANSYS. Результаты показывают, что при определённых сочетаниях напряжений от начального прогиба и термонапряжений возможна потеря устойчивости ПСБ, однако на практике такой вариант следует исключить, например, используя упругий узел крепления ПСБ. Показана возможность использования аппроксимации поля температур (23) в качестве корректной его оценки (рисунок 7 а). Аналогично показана возможность использования приближенной зависимости для прогибов (24) в качестве корректной их оценки (рисунок 7 б).

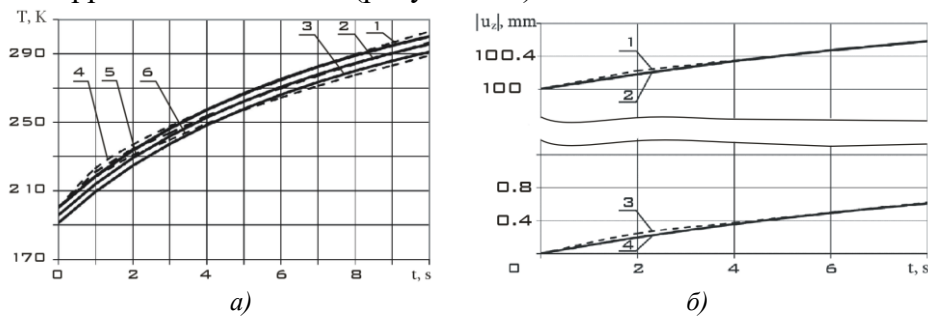


Рисунок 7 – Динамика изменения: а) температур поверхностного слоя пластины при начальном прогибе $u_{z0} = -0,1 x^2/l^2$, полученная: в результате численного моделирования: 1 – вблизи заделки ($x \approx 0$); 2 – в середине пластины ($x \approx l/2$); 3 – на свободном краю пластины ($x \approx l$); по формуле (30) при $C = 200 \text{ K/m}$, $\beta = 1 \text{ s}$ и $M = 3 \text{ K/m}$: 4 – вблизи заделки ($x \approx 0$); 5 – в середине пластины ($x \approx l/2$); 6 – на свободном краю пластины ($x \approx l$); б) прогибов u_z концевое сечения пластины ($x = l$): при начальном прогибе $u_{z0} = -0,1 x^2/l^2$: 1 – по результатам вычислительного эксперимента; 2 – по приближенной зависимости (24); без начального прогиба: 3 – по результатам вычислительного эксперимента; 4 – по приближенной зависимости (24)

Проведена валидация приближенных аналитических решений для поля температур (23) и поля прогибов (24) тонкой пластины при температурном ударе путём сравнения с данными экспериментов, проведённых с ПСБ ROSA в

2017 году на борту МКС, в земных условиях на симуляторе космической среды КМ7 с секцией космической фермы, а также в наземной вакуумной камере с уменьшенной моделью (масштаб 1/10) ПСБ ROSA. Результаты показывают хорошую сходимость.

В четвёртой главе построена математическая модель углового движения МКА с учётом температурного удара и представлены оценки возмущений от температурного удара с использованием (24) в виде:

$$\Phi_{zi} = - \int_0^{m_i} w_{zi}(x_i, t) dm_i = \frac{12}{5} \frac{m_i Al_i^4 \beta}{(t + \beta)^3} - \frac{m_i}{l_i} \int_0^{l_i} \frac{\partial^2 u_{z_0}(x_i, t)}{\partial t^2} dx_i, \quad (29)$$

$$\Phi_{yi} = - \frac{m_i}{l_i b_i} \int_0^{l_i} \int_0^{b_i} w_{yi}(x_i, y_i, t) dy_i dx_i, \quad (30)$$

$$\Phi_{xi} = - \int_0^{m_i} w_{xi}(x_i, t) dm_i = - \frac{m_i}{l_i} \int_0^{l_i} w_{xi}(x_i, t) dx_i = \frac{591}{1920} \frac{\alpha A Cl_i \beta (2\beta - t)}{(t + \beta)^4}, \quad (31)$$

$$M_y(\Phi_{yi}) = - \int_0^{m_i} w_{zi}(x_i, t) x_i dm_i = \frac{26}{15} \frac{m_i Al_i^5 \beta}{(t + \beta)^3} - \frac{m_i}{l_i} \int_0^{l_i} \frac{\partial^2 u_{z_0}(x_i, t)}{\partial t^2} x_i dx_i. \quad (32)$$

где $\vec{w}(w_x, w_y, w_z)$ – компоненты вектора ускорений точек ПСБ.

Для симметричной относительно оси ox ПСБ $\Phi_{yi} = 0$.

На основе моделей движения МКА с учётом температурного удара был разработан метод учёта его влияния на динамику МКА, состоящий из следующей совокупности элементов.

- Основополагающий принцип учёта, позволяющий ответить на вопрос о целесообразности учёта и сформировать методическую основу стратегии учёта влияния температурного удара на динамику МКА. (Он включает в себя *функциональный принцип* оценки степени влияния температурного удара на качество выполнения МКА целевых задач; *геометрический принцип* оценки симметрии МКА с точки зрения наличия и расположения ПСБ; *конструктивный принцип* оценки полноты использования конструктивных приёмов для снижения влияния температурного удара на динамику МКА и *эксплуатационный принцип* оценки необходимости использования технических средств для снижения влияния температурного удара и повышения эффективности выполнения МКА его целевых задач).

- Критерии необходимости учёта, позволяющие на основе первичной информации сделать вывод о значимости влияния температурного удара на динамику МКА и степени его учёта для корректного описания движения МКА. (Если применение основополагающего принципа учёта позволяет сделать вывод о необходимости такого учёта, то следует понять, каким по значимости фактором (*малым, значимым* или *определяющим*) будут возмущения от температурного удара. При решении одной и той же задачи значимость может быть разной: для ДЗЗ с разрешением 1000 м – малый, а 10 м – значимый фактор).

- Приближённые зависимости для получения первичной информации, позволяющие сделать количественную оценку влияния температурного удара на динамику МКА. (В работе для этой цели получены зависимости (29)-(32)).

- Совокупность правил применения основополагающего принципа, обеспечивающая получение адекватной оценки путём выявления границ применимости приближенных зависимостей для конкретной решаемой задачи с учётом моделируемой ситуации. (Малый, значимый или определяющий вклад

возмущений от температурного удара позволяет использовать одно- или двумерную постановку. Эта совокупность правил представлена в работе критериями учёта двумерности).

Представлена система управления угловым движением МКА на основе КУДМ (для несимметричной схемы) и электротермического микродвигателя (ЭТМД) (для симметричной схемы). В классической схеме КУДМ использованы четыре двигателя-маховика. Три являются основными и совпадают осями вращения с соответствующими осями связанной системы координат МКА. Четвёртый двигатель-маховик является резервным и устанавливается, как правило, под углом 45^0 к каждому из основных двигателей. Он используется при достижении критического собственного кинетического момента одним из основных двигателей, а также при отказах. В работе предлагается изменить классическую схему, 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 МКА. Проведено численное моделирование для МКА с одной и двумя ПСБ (несимметричная и симметричная схема ПСБ МКА).

На рисунке 8 показаны перемещения центра масс МКА от температурного удара. При моделировании использовались данные МКА ЕО-1 (несимметричная схема ПСБ) и «Аист-2Д» (симметричная схема ПСБ). Результаты моделирования представлены на рисунках 9-11.

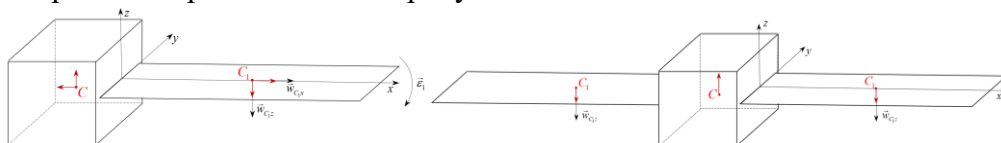


Рисунок 8 – Перемещения центра масс МКА от температурного удара при несимметричной и симметричной схеме расположения ПСБ

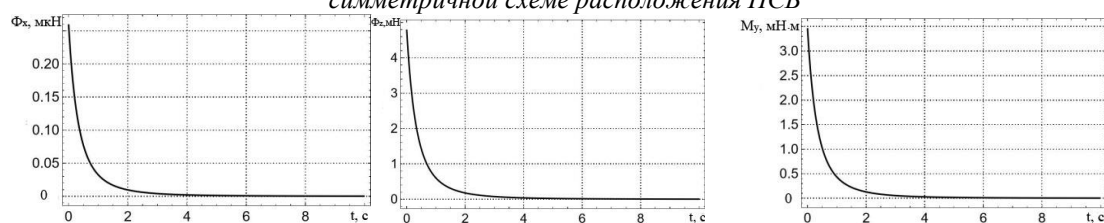


Рисунок 9 – Возмущения от температурного удара для несимметричной схемы ПСБ

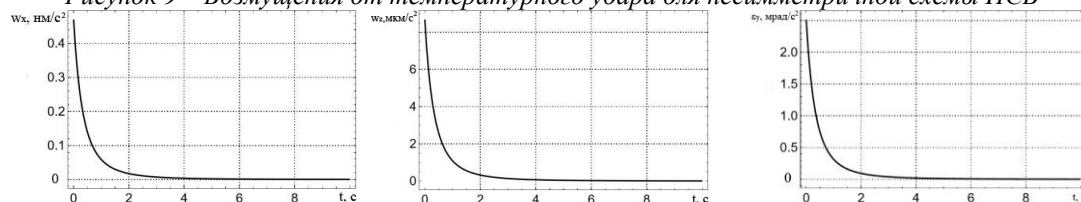


Рисунок 10 – Компоненты линейного и углового ускорений для несимметричной схемы ПСБ

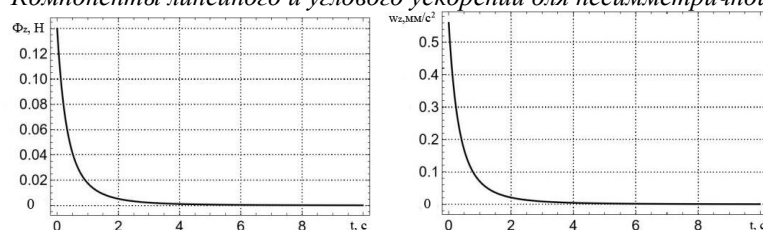


Рисунок 11 – Возмущение и вызванное им ускорение центра масс для симметричной схемы ПСБ

При несимметричной схеме ПСБ температурный удар оказывает более широкое влияние на угловое движение МКА, чем при симметричной, поскольку в последнем случае часть возмущений от разных ПСБ взаимно компенсируется (рисунок 8).

Предположим, что в момент температурного удара несимметричный МКА имел нулевую угловую скорость, а оптическая ось его целевой аппаратуры была направлена строго на центр inspectируемого объекта. Из рисунка 10 видно, что основное влияние происходит в первые две секунды с момента температурного удара. Исследуем угловое движение и снижение точности привязки за это время.

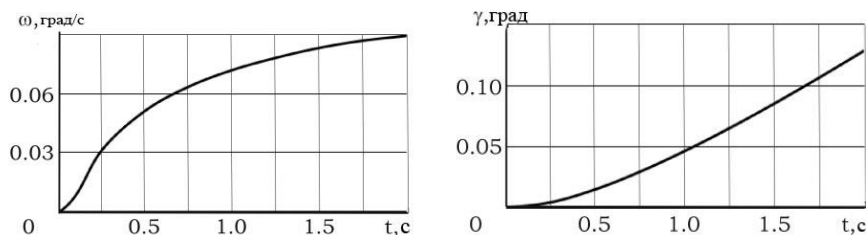


Рисунок 12 – Угловая скорость МКА ЕО-1 и угол разориентации его оптической оси

Угловая скорость и угол разориентации МКА, соответствующая рисунку 10, будет иметь вид, представленный на рисунке 12. Предположим, что высота орбиты МКА составляет 400 км. В этом случае угловой размер inspectируемого объекта может быть оценён как: $\alpha = \arctan(l/H)$. Тогда угол в $0,128^\circ$ соответствует примерно характерному размеру l объекта в 1120 м. Эти результаты показывают значимость влияния температурного удара для эффективного выполнения целевых задач ДЗЗ.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

1 Построена модель движения МКА с учётом возмущений от температурного удара.

Для случая значимого влияния температурного удара построенная модель позволила примерно до 10 % уточнить состав подлежащих учёту возмущающих факторов, действующих на МКА на орбитах, где можно пренебречь влиянием атмосферы. Это способствует более корректному описанию движения МКА, что повышает эффективность решения им целевых задач при реализации закона управления, построенного на предлагаемой модели движения МКА.

2 Разработан метод учёта влияния температурного удара на динамику движения МКА, позволяющий проводить корректный учёт температурного удара для случаев, когда его влияние на движение МКА является значимым. Данный метод предполагается использовать при моделировании движения МКА.

3 Предложена система управления угловым движением МКА на основе КУДМ и ЭТМД, позволяющая нивелировать последствия температурного удара на качество решения целевых задач МКА (например, высокоточного ДЗЗ).

4 Получены приближённые аналитические зависимости компонентов вектора перемещений и поля температур ПСБ МКА в рамках одномерной задачи теплопроводности для оценки возмущений от температурного удара.

5 Получены приближённые аналитические зависимости компонентов вектора перемещений и поля температур ПСБ МКА в рамках двумерной задачи теплопроводности для оценки возмущений от температурного удара. По сравнению с одномерной постановкой в двумерной предполагается статический учёт собственных колебаний ПСБ за счёт начального прогиба в момент

температурного удара.

6 Созданы критерии учёта двумерности, позволяющие корректно описывать температурный удар при различных начальных условиях. Эти критерии показывают возможность применения оценок в рамках одномерной модели либо необходимость усложнения задачи до двумерной постановки для получения корректных оценок влияния температурного удара.

7 Проведено численное моделирование возмущающих факторов от температурного удара, влияющих на динамику движения МКА, для случая симметричного и несимметричного МКА. Его результаты показывают возможность увеличения точности привязки МКА на 5 % (для МКА ЕО-1). При проведении высокоточной съёмки такое уточнение является существенным.

Полученные результаты позволяют корректно моделировать угловое движение МКА, определяя смещение оптической оси целевой аппаратуры или микроускорения от температурного удара, что повышает эффективность выполнения МКА целевых задач. Таким образом, цель работы достигнута.

СПИСОК ОСНОВНЫХ НАУЧНЫХ РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

ВАК по специальности:

1 Седельников, А.В. Исследование возмущений от температурного удара панели солнечной батареи при моделировании вращательного движения малого космического аппарата вокруг центра масс / А.В. Седельников, Д.И. Орлов, **В.В. Сердакова**, А.С. Николаева // Труды МАИ. – 2022. – № 126. – 11.

2 Седельников, А.В. Моделирование возмущений от температурного удара при вращательном движении космического аппарата ЕО-1 / А.В. Седельников, А.С. Николаева, **В.В. Сердакова** // Труды МАИ. – 2023. – № 132.

3 Седельников, А.В. Проверка адекватности приближенных аналитических зависимостей для прогиба тонкой однородной пластины при температурном ударе / А.В. Седельников, **В.В. Сердакова**, А.С. Николаева // Труды МАИ. – 2024. – № 134.

Scopus/WoS: Журналы Scopus/WoS квартиля Q1:

1 Sedelnikov, A.V. Investigating the temperature shock of a plate in the framework of a static twodimensional formulation of the thermoelasticity problem / A.V. Sedelnikov, **V.V. Serdakova**, D.I. Orlov, A.S. Nikolaeva // Aerospace. – 2023. – Vol. 10. – № 5. – 445.

2 Sedelnikov, A.V. Method of taking into account influence of thermal shock on dynamics of small satellite and its use in analysis of microaccelerations / A.V. Sedelnikov, A.S. Nikolaeva, **V.V. Serdakova**, E.S. Khnyreva // Technologies. – 2024. – Vol. 12. – № 10. – 207.

Журналы Scopus/WoS квартиля Q2:

1 Sedelnikov, A.V. Construction of the criterion for using a two-dimensional thermal conductivity model to describe the stress-strain state of a thin plate under the thermal shock / A.V. Sedelnikov, **V.V. Serdakova**, E.S. Khnyreva // Microgravity Science and Technology. – 2021. – Vol. 33. – № 6. – 65.

2 Sedelnikov, A.V. Modeling the Effect of a Temperature Shock on the Rotational Motion of a Small Spacecraft, Considering the Possible Loss of Large Elastic Elements Stability / A.V. Sedelnikov, **V.V. Serdakova**, D.I. Orlov, A.S. Nikolaeva, M.A. Evtushenko // Microgravity Science and Technology. – 2022. – Vol. 34. – № 4. – 78.

3 Sedelnikov, A.V. The Symmetric Formulation of the Temperature Shock Problem

for a Small Spacecraft with Two Elastic Elements / A.V. Sedelnikov, D.I. Orlov, **V.V. Serdakova**, A.S. Nikolaeva // Symmetry. – 2023. – Vol. 15. – № 1. – 172.

4 Sedelnikov, A.V. Investigation of the stress-strain state of a rectangular plate after a temperature shock / A.V. Sedelnikov, D.I. Orlov, **V.V. Serdakova**, A.S. Nikolaeva // Mathematics. – 2023. – Vol. 11. – № 3. – 638.

5 Sedelnikov, A.V. Method of taking into account influence of thermal shock on dynamics of small satellite and its use in analysis of microaccelerations / A.V. Sedelnikov, **V.V. Serdakova**, A.S. Nikolaeva // Microgravity Science and Technology. – 2023. – Vol. 35. – № 3. – 25.

Журналы Scopus/WoS (статья Article):

1 Belousova, D.A. Modeling the temperature shock of elastic elements using a one-dimensional model of thermal conductivity / D.A. Belousova, **V.V. Serdakova** // International Journal of Modeling, Simulation, and Scientific Computing. – 2020. – Vol. 11. – № 6. – 2050060.

2 Sedelnikov, A.V. Simulating the stress-strain state of a thin plate after a thermal shock / A.V. Sedelnikov, S.V. Glushkov, **V.V. Serdakova**, M.A. Evtushenko, E.S. Khnyreva // International Journal of Modeling, Simulation, and Scientific Computing. – 2022. – Vol. 13. – № 3. – 2250024.

3 Sedelnikov, A.V. Numerical simulation of the stress-strain state of a thin plate in the ANSYS package as a two-dimensional formulation of the thermo-elasticity problem / A.V. Sedelnikov, **V.V. Serdakova**, A.S. Nikolaeva, Evtushenko M.A. // Applications of Modelling and Simulation. – 2023. – Vol. 7. – P. 156–167.

4 Sedelnikov, A.V. Approximate Solution of Initial Boundary Value Problem of OneDimensional Heat Conduction for the Thermal Shock of Thin Plate / A.V. Sedelnikov, A.S. Nikolaeva, **V.V. Serdakova**, M.A. Evtushenko // WSEAS Transactions on Applied and Theoretical Mechanics. – 2024. – Vol. 19. – P. 200–205.

Журналы Scopus/WoS (статья Conference Paper):

1 Sedelnikov, A.V. The importance of a three-dimensional formulation of the thermal conductivity problem in assessing the effect of a temperature shock on the rotational motion of a small spacecraft / A.V. Sedelnikov, D.I. Orlov, **V.V. Serdakova** et al. // E3S Web of Conferences. – 2023. – 371. – 03015.

2 Orlov, D.I. Investigating the Features of Various Plate Models Under the Thermal Shock in the ANSYS Package / D.I. Orlov, **V.V. Serdakova**, M.A. Evtushenko, E.S. Khnyreva, A.S. Nikolaeva // Lecture Notes in Networks and Systems. – 2023. – Vol. 574. – P. 3085–3093.

3 Sedelnikov, A.V. The importance of a three-dimensional formulation of the thermal conductivity problem in assessing the effect of a temperature shock on the rotational motion of a small spacecraft / A.V. Sedelnikov, D.I. Orlov, **V.V. Serdakova** et al. // E3S Web of Conferences. – 2023. – 371. – 03015.

4 **Serdakova, V.V.** Comparative analysis of problem of thermal shock of elastic elements of small satellite in one-dimensional and two-dimensional formulations / **V.V. Serdakova** // E3S Web of Conferences. – 2023. – 402. – 11014.

5 **Serdakova, V.V.** Estimation of Maximum Temperature Deformations of Solar Panels of Earth Remote Sensing Small Satellite “Aist-2D” / **V.V. Serdakova** // Advances in Machinery, Materials Science and Engineering Application IX. – 2023. – P. 411–417.

ВАК прочие:

1 Седельников, А.В. Реализация контроля тяги электротермического микродвигателя при снижении микроускорений от температурного удара / А.В. Седельников, А.С. Танеева, Д.И. Орлов, **В.В. Сердакова**, Е.С. Хнырева, Е.С.

Матвеева // Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика. – 2021. – № 4. – С. 27–32.

Материалы конференций:

1 Седельников, А.В. Моделирование температурного удара однородной тонкой пластины / А.В. Седельников, А.С. Николаева, М.Е. Браткова, **В.В. Сердакова** // Обзорение Прикладной и промышленной математики. – 2023. – Т. 30. – Вып. 1. – С. 1-3.

2 **Сердакова, В.В.** Использование различных моделей теплопроводности для оценки влияния температурного удара больших упругих элементов на вращательное движение малого космического аппарата / **В.В. Сердакова** // Королёвские чтения: материалы Всероссийской молодёжной научной конференции с международным участием, посвящённой 35-летию со дня первого полёта МТКС «Энергия – Буран», 3–5 октября 2023 г. В 2 томах. Том 1. – Самара: Издательство Самарского университета, 2023. – с. 45.

3 Седельников, А.В. Исследование температурного поля больших упругих элементов малого космического аппарата дистанционного зондирования Земли для оценки влияния температурного удара на его вращательное движение / А.В. Седельников, А.С. Николаева, Д.И. Орлов, Е.С. Хнырева, **В.В. Сердакова** // Сборник трудов по материалам VIII Международной конференции и молодёжной школы. Самара, 2022, Т.2. – 24002.

4 Sedelnikov, A.V. Evaluation of the Effect of the Difference between the Real Attachment Unit and the Sealing in the Study of the Stress-Strain State of the Solar Panel of a Small Spacecraft as a Result of a Temperature Shock / A.V. Sedelnikov, **V.V. Serdakova** // Applied Mechanics and Materials. – 2021. – Vol. 904. – P. 27–34.

Свидетельства о государственной регистрации программы для ЭВМ:

1 Свид. № 2022665952 Исследование напряженно-деформированного состояния однослойной пластины при температурном ударе в пакете ANSYS / Седельников А.В., Глушков С.В., **Сердакова В.В.**, Евтушенко М.А., Николаева А.С., заявл. 02.08.2022, опубл. 23.08.2022.

2 Свид. № 2023611366 Исследование напряженно-деформированного состояния многослойной пластины при температурном ударе в пакете ANSYS / Седельников А.В., Глушков С.В., **Сердакова В.В.**, Евтушенко М.А., Николаева А.С., заявл. 09.01.2023, опубл. 19.01.2023.

Подписано в печать 15.10.2025. Формат 60 × 84 1/16.

Отпечатано на ризографе. Усл. печ. л. 1.

Тираж 100 экз.

ИП Гриценко А.В.

Отдел малотиражной полиграфии.

675000, г. Благовещенск, ул. Горького д. 172/1, офис 15.