



САМАРСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ
SAMARA UNIVERSITY

федеральное государственное автономное
образовательное учреждение высшего образования
«Самарский национальный исследовательский университет
имени академика С.П. Королева»

ул. Московское шоссе, д. 34, г. Самара, 443086
Тел.: +7 (846) 335-18-26, факс: +7 (846) 335-18-36
Сайт: www.ssau.ru, e-mail: ssau@ssau.ru
ОКПО 02068410, ОГРН 1026301168310,
ИНН 6316000632, КПП 631601001

УТВЕРЖДАЮ

И.о. первого проректора –

проректора по науке
кандидат экономических наук,
доцент



Д.Е. Пашков

2025 г.

24 АПР 2026

№ 104-2298

ОТЗЫВ ВЕДУЩЕЙ ОРГАНИЗАЦИИ

на диссертацию **Васьковой Варвары Сергеевны**

«Задачи динамики космического аппарата с солнечным парусом

при движении вдоль леерной связи»,

представленной на соискание ученой степени

кандидата физико-математических наук по специальности

1.1.7. Теоретическая механика, динамика машин

Актуальность темы исследования

Диссертационная работа Васьковой Варвары Сергеевны посвящена решению задач перемещения космических аппаратов между близко расположенными космическими станциями, причем в качестве движителя предполагается применить солнечный парус. Для реализации движения по заданной траектории в качестве направляющей используется трос, длина которого превосходит расстояние между космическими станциями, на которых закреплены его концы. Такой подход представляется актуальным с точки зрения космической практики, так как предлагает альтернативу ракетным двигателям, позволяющую экономить столь ценный ресурс, как топливо. С другой стороны, тема диссертации является актуальной с теоретической точки зрения и содержит исследования механической системы с неударживающей связью, являющейся математической моделью космической формации, включающей тросовую систему и аппарат с солнечным парусом. Теории, относящиеся к составным частям системы, ранее развивались практически независимо друг от друга.

ОТДЕЛ КОРРЕСПОНДЕНЦИИ
И КОНТРОЛЯ ИСПОЛНЕНИЯ
ДОКУМЕНТОВ МАИ

28.04 2026 г.

В данной диссертационной работе разработаны алгоритмы перемещения космического аппарата, оснащенного солнечным парусом между точками границы леерной связи, являющейся математической моделью ограничения, накладываемого на движение тросом, соединяющим две гелиоцентрические орбитальные станции. Для вычисления динамических характеристик движения введены функции, определяющие величину силы солнечной радиации, в том числе при взаимодействии со связью, а также проведён анализ сил, действующих на космический аппарат. При этом используется модель, предполагающая солнечный парус плоской пластиной, которая функционирует подобно зеркалу и частично поглощает солнечную радиацию.

Выведены условия, при которых трос натянут во все время движения. Указан способ управления положением солнечного паруса, обеспечивающий максимальное касательное ускорение аппарата в орбитальной системе отсчета. Результаты применения разработанных алгоритмов проиллюстрированы таблицами динамических характеристик перемещения на расстояние нескольких километров для реальных аппаратов, откуда следует, что несмотря на объективную малость силы солнечной радиации, продолжительность движения оказывается приемлемой для практики, а сила натяжения троса крайне малой.

Общая характеристика диссертационной работы по главам

Диссертация В.С. Васьковой состоит из введения, трех глав, заключения, списка использованной литературы, содержащего 118 наименований и двух приложений. Общий объем диссертации составляет 96 страниц.

Во **введении** обоснована актуальность, а также теоретическая и практическая значимость темы диссертационного исследования. Дан достаточно подробный обзор современного состояния исследований в теории космических тросовых систем и полета с солнечным парусом. Сформулированы цели и задачи исследования. Дано краткое описание диссертации по главам.

В **первой главе** описывается математическая модель солнечного паруса, являющегося плоской пластиной, частично отражающей и частично поглощающей солнечную радиацию. Вводятся понятия базовой и производной калибровочных характеристик, безразмерных функций, характеризующих соответственно способность паруса создавать ускорение, направленное под углом к солнечным лучам и касательное ускорение, если траектория движения задана. Описывается математическая модель леерной связи, как ограничения, возникающего при движении космического аппарата вдоль идеального троса, концы которого закреплены на космических станциях. Формулируется модельная задача движения космического аппарата, оснащенного солнечным

парусом, вдоль леерной связи, закреплённой на двух тяжёлых космических станциях, описывающих одну круговую гелиоцентрическую орбиту и расположенных на расстоянии нескольких километров друг от друга. Оцениваются силы, действующие на космический аппарат в орбитальной системе отсчета, и делается вывод о том, что движение с натянутым тросом в плоскости орбиты космических станций происходит так, как если бы орбитальная система отсчета была инерциальной. Следует, однако, заметить, что кориолисова сила может оказывать некоторое влияние на силу натяжения троса и в некоторых ситуациях приводить к его ослабеванию.

Во **второй главе**, в рамках сформулированной модельной задачи, описывается движение вдоль границы леерной связи космического аппарата с постоянно ориентированным солнечным парусом. Устанавливается, что в орбитальной системе отсчета, в случае, когда трос все время натянут, такое движение представляет собой маятниковые колебания по дуге эллипса с фокусами в точках закрепления троса, причем сила солнечной радиации ортогональна прямой, проходящей через концы дуги. Формулируются и строго математически доказываются условия натянутости троса, заключающиеся в неотрицательности скалярных произведений внешних нормалей к эллипсу в концах дуги на ту же нормаль в некоторой характерной точке этой дуги. Необходимо отметить, что эти условия не учитывают силу Кориолиса, способную в некоторых частных случаях ослабить трос. На основе выведенных условий строится множество всех пар точек, между которыми возможны связные, то есть без ослабления троса, маятниковые колебания. Строится алгоритм перемещения космического аппарата между точками эллипса, являющимися элементом этого множества. Стоит отметить, что практически все вычисления в рамках алгоритма являются чисто аналитическими, основанными на геометрических свойствах эллипса и использующими теорему об изменении кинетической энергии. Исключение составляет вычисление продолжительности перемещения, для чего применяется своеобразная модификация метода численного интегрирования Симпсона в комбинации с кинематическими свойствами движения. В качестве примера решается задача об оптимальной длине троса с точки зрения минимизации продолжительности перелёта между наиболее удалёнными точками леерной связи, приводятся некоторые результаты анализа динамических характеристик движения. В частности, устанавливается, что если расстояние между станциями порядка 2 км, то перемещение между ними на расстоянии 0.5 а.е. от Солнца заняло бы не более нескольких часов, что вполне приемлемо для практики с учетом отсутствия затрат топлива.

В третьей главе строится алгоритм перемещения космического аппарата между точками границы леерной связи, предполагающий возможность управления положением солнечного паруса с целью сокращения продолжительности перелета. Рассматривается два варианта перемещения: когда начальная скорость космического аппарата с парусом в орбитальной системе отсчета равна нулю и когда нулевыми являются как начальная, так и конечная скорость. Обе ситуации предполагают, что положение паруса выбирается так, чтобы обеспечить максимально возможное касательное ускорение. В этом случае на дуге эллипса ищется точка, разделяющая путь на участки ускорения и замедления. Можно предположить, что такой алгоритм является оптимальным по быстродействию, но строгое доказательство этого в работе отсутствует. Алгоритм основан на результатах первой главы и использовании, как и во второй главе, теоремы об изменении кинетической энергии. Для его реализации требуется более сложный аппарат методов численного интегрирования, чем в предыдущей главе. В частности, используется их модификация для вычисления несобственных интегралов. При этом продолжительность перелета находится аналогично второй главе. Как и для случая движения с постоянно ориентированным парусом между наиболее удаленными вершинами эллипса, находится оптимальная по быстродействию длина троса, приводятся примеры вычисления динамических характеристик перемещения для реальных космических аппаратов. Как и следовало ожидать, перелет с управляемым парусом оказывается быстрее, чем с постоянно ориентированным. Однако, перелет на 20 км может занимать время, превышающее двое суток. Следует также отметить, что во всех рассматриваемых случаях максимальное натяжение троса не превышает 2 гс (менее 20 мН), то есть для реализации перелетов достаточно очень слабого на разрыв троса.

В заключении диссертационной работы приведены основные результаты и выводы выполненного исследования.

В приложениях приводятся примеры работы программного обеспечения, реализующего алгоритмы из второй и третьей глав диссертации, а также краткая инструкция по работе с этим обеспечением.

Научная новизна результатов и выводов

В диссертационной работе предложен и теоретически обоснован энергонезависимый способ перемещения грузов между гелиоцентрическими космическими станциями, представляющий собой движение космического аппарата с солнечным парусом под воздействием силы солнечной радиации вдоль троса, связывающего станции. Относительные движения, вызванные только силой солнечной радиации, в рамках механической системы,

сочетающей элементы космической тросовой системы и солнечный парус, ранее не изучались. Все результаты и выводы рецензируемой диссертации, выносимые на защиту, являются новыми.

Достоверность

Достоверность полученных результатов в диссертационной работе Васьковой В.С. обеспечивается использованием строгих математических методов классической и небесной механики, обоснованной точностью численных расчетов, согласованностью результатов, полученных численно и аналитически.

Теоретическая значимость результатов

Теоретическая значимость результатов исследования, проведенного в диссертации Васьковой В.С., заключается в построении математической модели небесно-механической системы, объединяющей космическую тросовую систему и космический аппарат, оснащенный солнечным парусом, и в исследовании ее относительных движений. Интересными представляются выведенные в работе условия нахождения на связи (условия натянутости троса), способ выбора ориентации паруса, обеспечивающий максимальное ускорение при движении вдоль троса, алгоритмы перемещения аппарата с постоянно ориентированным и управляемым, с целью минимизации продолжительности перелета, парусом. Важным вкладом в теорию движения под солнечным парусом можно считать предложенные автором функции, характеризующие возможности паруса, названные калибровочными характеристиками.

Практическая значимость результатов работы

Практическая значимость диссертационной работы состоит в том, что ее результаты могут быть непосредственно использованы при планировании и реализации комплексных миссий в дальнем космосе.

Публикации

По теме диссертации опубликовано 5 работ в рецензируемых научных журналах из перечня ВАК, либо международных системах цитирования Web of Science и Scopus. Результаты проведенного исследования докладывались автором диссертационной работы на научных семинарах, российских и международных конференциях.

Автореферат полностью и точно отражает содержание диссертации. Диссертационное исследование полностью соответствует паспорту научной специальности 1.1.7. Теоретическая механика, динамика машин.

Замечания по диссертационной работе

По диссертационной работе имеются следующие замечания:

1. Представленная математическая модель предполагает, что

гелиоцентрические станции настолько массивны, что перемещающийся вдоль троса космический аппарат не оказывает влияния на их движение. Несмотря на объективно малое натяжение троса, такое влияние может быть существенным. В диссертации дана ссылка на работу, где обосновывается возможность сохранения взаимного положения станций с помощью дополнительных солнечных парусов, но не учитывается потенциальный сход станций с их первоначальной орбиты, что существенно при многократном использовании предложенных алгоритмов перемещения.

2. В диссертации упоминаются ситуации, когда при очень малой относительной скорости космического аппарата кориолисова сила может приводить к ослабеванию троса, которое предлагается устранить дополнительным поворотом паруса. Соответствующие случаи подробно не описаны и их продолжительность не определена.

3. В работе не приведены оценки расстояния между станциями и длины троса, при которых описание движения в рамках предложенной математической модели остается адекватным, для всех приведенных примеров модель применима.

4. Для функционирования программного обеспечения, реализующего разработанные алгоритмы, необходима среда Maple. Можно предложить автору в будущем модернизировать ПО так, чтобы устранить это ограничение, и расширить описание слишком краткого руководства, приведенного в одном из приложений.

5. В тексте диссертации имеются шероховатости стиля изложения и опечатки. Например, в одной из фраз на стр. 16 пропущены слова «от Солнца», на стр. 32 есть пунктуационная ошибка, и т.п.

Данные замечания не влияют на общую положительную оценку диссертационной работы, которая выполнена на высоком научном уровне и содержит новые и значимые научные результаты.

Заключение

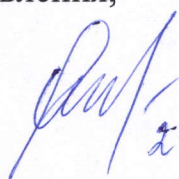
Диссертация Васьковой Варвары Сергеевны является законченной научно-исследовательской работой, которая посвящена актуальной научной проблеме. Достоверность выводов, полученных автором, не вызывает сомнений, все результаты диссертационной работы неоднократно и достаточно полно апробированы.

Диссертационная работа Васьковой Варвары Сергеевны «Задачи динамики космического аппарата с солнечным парусом при движении вдоль леерной связи» отвечает всем требованиям Постановления Правительства РФ от 24.09.2013 № 842 «О порядке присуждения ученых степеней», а ее автор Васькова Варвара Сергеевна заслуживает присуждения ей ученой степени

кандидата физико-математических наук по специальности
1.1.7. Теоретическая механика, динамика машин.

Отзыв на диссертацию обсужден и одобрен на заседании кафедры динамики полёта и систем управления федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королева» 21.04.2026 г., протокол заседания № 10.


Заведующий кафедрой
динамики полета и систем управления,
доктор технических наук,
профессор



Старинова Ольга Леонардовна

22.04.2026

С отзывом ознакомлена - 28.04.2026.

 - Васильова В.С.

Почтовый адрес: 443086

Телефон: +7 (902) 379-47-04

Адрес электронной почты: starinova@ssau.ru

Организация - место работы: Самарский университет,
кафедра динамики полёта и систем управления

Должность: заведующий кафедрой

Web-сайт организации: <https://ssau.ru/>