

УТВЕРЖДАЮ:

Первый заместитель генерального
конструктора, главный конструктор
бортовых и наземных комплексов
управления и систем,
доктор технических наук,
профессор, академик РАН
Микрин Евгений Анатольевич



« » 2015 г.



ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Открытого акционерного общества
«Ракетно-космическая корпорация «Энергия» им. С.П. Королёва»

Диссертация Зыкова Александра Владимировича «Исследование динамики управляемого движения космического аппарата с большим вращающимся солнечным парусом» выполнена в Открытом акционерном обществе Ракетно-космической корпорации «Энергия» им. С.П. Королёва (далее – РКК Энергия) в отделе динамики и программного обеспечения системы управления движением и навигации (СУДН).

В период подготовки диссертации соискатель обучался в очной аспирантуре Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Московский физико-технический институт (государственный университет)» (далее – МФТИ) на факультете аэрофизики и космических исследований, а также работал инженером-математиком в РКК Энергия, отдел 033 «Динамики и программного обеспечения СУДН».

В 2009 году А.В. Зыков окончил с отличием МФТИ по специальности «Прикладные математика и физика». В 2012 году А.В. Зыков окончил очную аспирантуру МФТИ. Справка о сдаче кандидатских экзаменов по специальности 01.02.01 – Теоретическая механика выдана МФТИ 21 мая 2015 года.

Научный руководитель – доктор технических наук Платонов Валерий Николаевич, заместитель начальника отделения 03 «Проектирования и разработки бортовых комплексов управления и программного обеспечения бортовых комплексов управления», начальник отдела 033 «Динамики и программного обеспечения СУДН» РКК Энергия.

Научный консультант – кандидат технических наук Тимаков Сергей Николаевич, ведущий научный сотрудник отдела 033 «Динамики и программного обеспечения СУДН» РКК Энергия.

Оценка выполненной соискателем работы

Диссертация на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук является законченной научно-квалификационной работой и посвящена решению важной научно-технической проблеме, а именно обеспечению управления космической платформой с большим вращающимся солнечным парусом (СП) на различных этапах ее функционирования путем совершенствования алгоритмов системы управления движением и системы управления выпуском СП из уложенного состояния, включающим новые научно обоснованные технические решения, имеющие существенное значение для практической космонавтики в части проектирования крупногабаритных разворачиваемых центробежными силами конструкций.

Личное участие автора в получении результатов научных исследований, изложенных в диссертации

В работе лично автором аналитически найдено решение уравнения движения мембраны СП в виде стационарной формы, возникающей при регулярной прецессии оси вращения паруса. Найденная стационарная форма паруса исследована на устойчивость и асимптотическую устойчивость.

На основе представления СП в виде гироскопа в упругом подвесе лично автором разработан алгоритм углового движения космической платформы. На основе разработанного алгоритма проведено полномасштабное моделирование динамики углового движения космической платформы с СП в режимах гашения начальных угловых скоростей и программных разворотов.

Лично автором предложена схема укладки СП в виде четырех геометрически симметричных тросов, намотанных на центральный барабан. В предположении центральной симметрии конструкционного расположения тросов и их синхронного выпуска рассмотрена динамика выпуска одного троса с точечной массой на конце. Получено аналитическое решение линеаризованной задачи выпуска невесомого троса с точечной массой на конце из цилиндрического контейнера, вращающегося с постоянной угловой скоростью. Решение найдено через функции Бесселя для случая равномерного выпуска и через гипергеометрические функции для случая равномерно замедленного выпуска.

Для проверки правильности аналитических решений лично автором была разработана математическая модель динамики разворачивания весомого троса, представленного совокупностью точечных масс, соединённых невесомыми нерастяжимыми нитями, а также проведено полномасштабное численное моделирование процесса выпуска троса из уложенного состояния.

Степень достоверности результатов проведенных исследований

Представленные в работе результаты исследований получены с использованием классических моделей, методов теоретической механики и механики космического полета, теории управления, а также теории динамических систем. Разработанные алгоритмы управления верифицированы численным моделированием динамики углового движения КА с СП и динамики разворачивания СП из уложенного состояния, что подтверждает достоверность и научную обоснованность результатов проведенных исследований.

Успешная апробация результатов исследований, приведенных в диссертации, на всероссийских и международных конференциях и полученное одобрение специалистами свидетельствует о высоком научном уровне и значимости полученных результатов.

Научная новизна

Научная новизна диссертации состоит в разработке математической модели динамики вращающегося мембранного диска с центральной жесткой вставкой, алгоритме управления углового движения космической платформой с СП, алгоритме выпуска СП из уложенного состояния за счет центробежных сил и заключается в следующем:

- Разработана математическая модель динамики вращающегося мембранного диска с центральной жесткой вставкой.
- Проведен анализ напряженно-деформированного состояния вращающегося пленочного диска, находящегося под нагрузкой сил солнечного давления и гироскопического момента, возникающего при повороте оси вращения центральной жесткой вставки отражателя.
- Найдена стационарная форма мембранного диска, возникающая при регулярной прецессии оси вращения паруса, как прямым интегрированием неоднородного уравнения в частных производных, так и методом Фурье, путем разложения решения в ряд по собственным функциям.
- Доказана устойчивость найденной стационарной формы паруса прямым методом Ляпунова.
- Доказана асимптотическая устойчивость найденной стационарной формы паруса в случае конструкционного демпфирования согласно гипотезе Фойгта.
- Представлены результаты аналитических и численных исследований динамического поведения КА в режимах гашения начальных угловых скоростей и программных разворотов.
- Найдено аналитическое решение уравнения малых поперечных колебаний точечной массы на невесомом тросе в процессе выпуска из вращающегося центрального блока. Решение найдено для случая равномерного выпуска через

функции Бесселя, а также для случая равномерно замедленного выпуска через гипергеометрические функции.

- Построена модель выпуска весомого троса, представленного в виде совокупности материальных точек, соединенных невесомыми нерастяжимыми нитями.

Практическая и теоретическая значимость

Диссертационное исследование направлено на решение фундаментальной научно-технической проблемы, а именно, на создание нового класса космических платформ различного назначения, не требующих расхода рабочего тела на траекторные и угловые маневры, а также разгрузку накопленного кинетического момента. Космические платформы с СП предназначены для решения крупных народно-хозяйственных и прикладных задач, среди которых:

- преобразование и ретрансляция энергии;
- теле-радио связь;
- создание космических электростанций;
- освещение районов Земли отраженным солнечным светом;
- создание параболических концентраторов и радиоантенн;
- очистка космоса от техногенных осколков.

Все результаты, полученные соискателем в диссертации, имеют ярко выраженную практическую направленность и могут быть использованы при проведении в космическом пространстве научных экспериментов по раскрытию, как солнечного паруса, так и тросовой системы, а также при управлении угловым движением КА с большим вращающимся СП.

Полученные результаты являются теоретической базой для разработки технического задания космического эксперимента «Знамя-3», введенного Федеральным космическим агентством в долгосрочную программу научно-прикладных исследований и экспериментов, планируемых на Российском сегменте Международной космической станции.

Также, полученные результаты могут быть включены в учебное пособие для студентов и аспирантов технических вузов, обучающихся по специальностям в области космической техники.

Ценность научных работ соискателя, полнота изложения материалов диссертации в работах, опубликованных соискателем

Тема диссертации раскрыта и правильно отражена в опубликованных соискателем работах. Всего по теме диссертации опубликовано 25 работ (включая тезисы) в том числе 5 в открытых изданиях, рекомендованных ВАК РФ, или из баз данных Web of Science и/или Scopus.

Перечень публикаций в открытых изданиях, рекомендованных ВАК:

1. Черемных Е.А., Зыков А.В. Разработка алгоритмов управления и исследование динамического поведения спутника с большим вращающимся солнечным парусом // Труды МАИ. 2011. № 45. С. 25.
2. Легостаев В.П., Субботин А.В., Тимаков С.Н., Зыков А.В. Об устойчивости стационарной формы вращающейся кольцеобразной мембраны с регулярно прецессирующей центральной жесткой вставкой // Труды МФТИ. 2011. Т. 3. № 3 (11). С. 73-78.
3. Легостаев В.П., Субботин А.В., Тимаков С.Н., Зыков А.В. Исследование динамики управляемого углового движения космического аппарата с вращающимся солнечным парусом // Труды МФТИ. 2013. Т. 5. № 2 (18). С. 106-119.
4. Амелькин Н.И., Зыков А.В. О равновесиях и устойчивости спутника с системой двухстепенных силовых гироскопов в центральном гравитационном поле // Труды МФТИ. 2014. Т. 6. № 2 (22). С. 68-74.
5. Зыков А.В., Легостаев В.П., Субботин А.В., Сумароков А.В., Тимаков С.Н. Динамика вращающегося солнечного паруса в процессе его раскрытия // Прикладная математика и механика. 2015. Т. 79. Вып. 1. С. 48-60.

Результаты, представленные в работе, методы и алгоритмы докладывались, обсуждались и получили одобрение специалистов на отечественных и международных конференциях и семинарах:

1. 9-ая международная конференция «Авиация и космонавтика – 2010» (16-18.11.2010, МАИ, Москва);
2. XIII, XV, XVI и XVII конференции молодых учёных «Навигация и управление движением» (15-17.03.2011, 12-15.03.2013, 11-14.03.2014, 17-20.03.2015, ЦНИИ «Электроприбор», Санкт-Петербург);
3. XIX и XX научно-технические конференции молодых ученых и специалистов (14-18.11.2011, 10-14.11.2014, РКК «Энергия», г. Королёв);
4. LIV, LV и LVI научные конференции МФТИ «Современные проблемы фундаментальных и прикладных наук» (25-26.11.2011, 19-25.11.2012, 25-30.11.2013, МФТИ, Долгопрудный);
5. Международные научные конференции по механике «Шестые Поляховские чтения» и «Седьмые Поляховские чтения» (2012, 2015, СПбГУ, Санкт-Петербург);
6. Семинары по механике космического полета им. В.А. Егорова на механико-математическом факультете МГУ под руководством А.Ю. Белецкого (25.04.2012, 03.04.2013, 14.05.2014, 19.11.2014, МГУ, Москва);

7. XXXVII и XXXIX Академические чтения по космонавтике «Актуальные проблемы Российской космонавтики» (2013, 2015, МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва);
8. 64-ый Международный астронавтический конгресс (23-27.09.2013, Пекин, Китай);
9. 7-я Российская мультиконференция по проблемам управления «Управление в морских и аэрокосмических системах (УМАС-2014)» (7-9.10.2014 года, ЦНИИ «Электроприбор», Санкт-Петербург);
10. Семинар кафедры теоретической механики МФТИ (21.11.2014, МФТИ, Долгопрудный);
11. Семинар по теории управления и динамике систем под руководством академика Ф.Л. Черноушко (25.12.2014, ИПМех РАН, Москва).

Специальность, которой соответствует диссертация

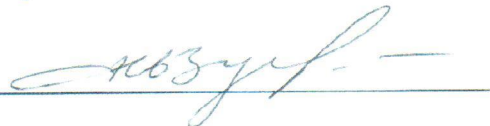
Диссертация Зыкова А.В. полностью соответствует паспорту специальности 01.02.01 – Теоретическая механика и охватывает следующие области исследований:

1. Теория устойчивости движения механических систем.
2. Управление движением механических систем, теория гироскопических и навигационных систем.
3. Прикладная небесная механика.

Диссертация к защите представляется впервые.

Вышесказанное дает основание секции НТС *рекомендовать к защите* диссертацию Зыкова А.В. «Исследование динамики управляемого движения космического аппарата с большим вращающимся солнечным парусом» на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.02.01 – Теоретическая механика в диссертационном совете Д 002.024.01 при Федеральном государственном бюджетном учреждении науки «Институт прикладной математики им. М.В. Келдыша Российской академии наук».

Заключение принято единогласно на заседании секции №9 научно-технического совета РКК «Энергия» 26 мая 2015 г. На заседании присутствовало 23 человека. Результаты голосования: «за» - 23 чел., «против» - нет, «воздержался» - нет, протокол № 104 от «26» мая 2015 г.



Зубов Николай Евгеньевич,
д.т.н., профессор,
заместитель председателя секции НТС



Богачев Алексей Викторович,
секретарь секции НТС