

УТВЕРЖДАЮ:

Первый проректор –
проректор по научной работе
д.т.н. профессор Зимин В.Н.

« 18 » *октября* 2017 г.



ЗАКЛЮЧЕНИЕ

федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования "Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана (национальный исследовательский университет)" (МГТУ им. Н.Э. Баумана)

Диссертация Гришко Дмитрия Александровича "Исследование схем облёта объектов крупногабаритного космического мусора на низких орбитах" выполнена на кафедре "Теоретическая механика" федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования "Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана (национальный исследовательский университет)" (МГТУ им. Н.Э. Баумана).

В период подготовки диссертации соискатель работал в МГТУ им. Н.Э. Баумана в должности ассистента кафедры "Теоретическая механика" факультета "Фундаментальные науки".

В 2014 году Д.А. Гришко окончил с красным дипломом МГТУ им. Н.Э. Баумана по специальности 160703 «Динамика полёта и управление движением летательных аппаратов». В 2014 году поступил в очную аспирантуру кафедры "Теоретическая механика" и в настоящее время является аспирантом этой кафедры. Справка о сдаче кандидатских экзаменов по специальности 01.02.01 выдана МГТУ им. Н.Э. Баумана 05.06.2017 года.

Научный руководитель – Лапшин Владимир Владимирович, доктор физико-математических наук, профессор. Работает в МГТУ им. Н.Э. Баумана в должности профессора кафедры «Теоретическая механика».

Научный консультант – Баранов Андрей Анатольевич, кандидат физико-математических наук, член-корреспондент Международной академии астронавтики (IAA). Работает в Федеральном государственном учреждении "Федеральный исследовательский центр Институт прикладной математики им. М.В. Келдыша Российской академии наук" в должности ведущего научного сотрудника (отдел №5 "Механика космического полёта и управление движением", сектор №2 "Механика и управление движением космических аппаратов").

Оценка выполненной соискателем работы

Диссертация на соискание учёной степени кандидата физико-математических наук является законченной научно-квалификационной работой и посвящена решению задачи выбора схем облёта объектов крупногабаритного космического мусора (ККМ) на низких орbitах. В работе рассмотрены два варианта увода объектов ККМ с наиболее

загруженных низких околокруговых орбит, на которых находятся 160 крупных ступеней ракет-носителей, классифицированных по пяти группам в зависимости от угла наклона орбитальной плоскости к экватору. В рамках первого варианта увод объектов ККМ осуществляется при помощи отделяемых модулей, которые обеспечивают перевод объектов на орбиты захоронения. При реализации второго варианта активный КА сам уводит объекты ККМ на орбиты захоронения. Выполнено исследование путей минимизации затрат суммарной характеристической скорости, необходимой для выполнения перелётов между несколькими объектами, рассмотрен вопрос определения приемлемого времени осуществления этих перелётов. Для каждого из двух вариантов увода объектов предложены оригинальные схемы облёта элементов выделенных групп ККМ, основанные на использовании целенаправленного изменения скорости прецессии орбитальной плоскости под действием нецентрального гравитационного поля Земли. Проведено сравнение энергетических и временных характеристик миссий по облёту групп ККМ с целью увода образующих их объектов на орбиты захоронения. Основным результатом работы является уточнение требований к космическому аппарату – сборщику ККМ.

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

Автором лично получены основные результаты диссертации:

1. Аналитически найдена формула, позволяющая для случая компланарного перевода космического аппарата (КА) вдоль орбиты получить значение компромиссной продолжительности такого перевода. Решение задачи учитывает нецентральность гравитационного поля Земли и, как следствие, необходимость коррекции возникающего при длительном фазировании расхождения орбитальных плоскостей по долготе восходящего узла (ДВУ).
2. Проведены численные исследования, направленные на поиск путей минимизации энергетических и временных затрат при некомпланарных перелётах между объектами ККМ с использованием орбиты ожидания. Показано влияние выбора направления поворота орбитальной плоскости по ДВУ на величину потребной для этого суммарной характеристической скорости с учётом малой (порядка 1 градуса) коррекции наклонения орбиты.
3. Введён в рассмотрение портрет эволюции отклонений долгот восходящих узлов, являющийся эффективным средством анализа относительной динамики орбитальных плоскостей объектов в рамках конкретной группы ККМ.
4. Для первого варианта увода объектов ККМ (с использованием агрегатов, отделяемых от КА-сборщика и обеспечивающих увод объектов на орбиты захоронения) предложены 2 схемы облёта: последовательная и диагональная. Последовательная схема основана на использовании специально формируемой орбиты ожидания. Для этой схемы разработаны методики определения компромиссной продолжительности перелёта между двумя объектами ККМ. Предложена и программно реализована диагональная схема облёта, которая предполагает, что орбитой ожидания может служить орбита очередного уводимого объекта.
5. Для второго варианта увода объектов ККМ (КА-сборщик самостоятельно уводит объект на орбиту захоронения, а затем возвращается за новым объектом) осуществлён

расчёт манёвров для каждой из пяти групп ККМ. Показано, что второй вариант увода и по энергетике, и по продолжительности миссии значительно уступает первому варианту.

6. Проведено сравнение вариантов увода и сформулированы требования к КА, предназначенному для облёта объектов ККМ с целью их увода на орбиты захоронения.

Степень достоверности результатов проведённых исследований

Представленные в работе результаты исследований получены с использованием классических моделей, методов теоретической механики и механики космического полёта. Разработанные методики оптимизации схем облёта объектов ККМ проверены численным моделированием перелётов, обеспечивающих решение некомпланарной задачи встречи с использованием орбиты ожидания (последовательная схема облёта при первом варианте увода ККМ). Погрешность расчёта манёвров в данной задаче является определяющей при оценке точности приведённых в диссертации расчётов. Сравнение с численным решением, полученным с использованием программного комплекса в ИПМ им. М. В. Келдыша и программного комплекса STK, подтвердило достоверность и научную обоснованность результатов проведённых исследований.

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

Научная новизна

Научная новизна диссертации состоит в разработке схем облёта объектов ККМ на низких орbitах с оптимизацией требуемых энергетических затрат при приемлемой суммарной продолжительности облёта, а также в определении требований к КА-сборщику и заключается в следующем.

1. Задача облёта объектов ККМ с целью их дальнейшего увода на орбиты захоронения в отечественной научной практике решается впервые;
2. Получена аналитическая зависимость, позволяющая определить компромиссную продолжительность перелёта от одного объекта к другому в случае компланарных орбит. Значение продолжительности перелёта определяет параметры манёвра для решения задачи встречи с учётом необходимости коррекции расхождения орбитальных плоскостей по ДВУ, возникающего в результате длительного фазирования;
3. Проведены исследования некомпланарных перелётов между объектами ККМ с использованием орбиты ожидания. Показано влияние выбора направления поворота орбитальной плоскости по ДВУ на величину потребной для этого суммарной характеристической скорости с учётом малой (порядка 1 градуса) коррекции наклонения орбиты.
4. Исследован каталог космических объектов и проведена классификация объектов ККМ (ступени и разгонные блоки) на низких орбитах. Выявлено 160 наиболее крупных объектов, которые разбиты по 5 группам, отличающимся значением наклонения орбит входящих в них объектов.

5. Введён в рассмотрение портрет эволюции отклонений ДВУ, который отображает относительную динамику орбитальных плоскостей в рамках конкретной группы и позволяет определить наиболее подходящую стратегию перелётов между объектами;
6. Рассмотрены два варианта увода объектов ККМ с низких орбит на специальные орбиты захоронения; показаны преимущества эллиптической орбиты захоронения;
7. Предложены последовательная и диагональная схемы облёта для первого варианта увода ККМ и последовательная схема с вовлечением орбиты захоронения для второго варианта увода ККМ;
8. Предложены подходы к определению компромиссного времени на конкретный перелёт для последовательной схемы при первом варианте увода объектов ККМ;
9. Осуществлено сравнение обоих вариантов увода объектов ККМ по таким параметрам, как: суммарная характеристическая скорость и продолжительность облёта, количество дозаправок топливом и отделяемыми агрегатами;
10. Определены требуемая длительность функционирования активного КА и его необходимый резерв СХС на одной заправке топливом, рациональное значение максимального количества отделяемых агрегатов на борту.

Теоретическая и практическая значимость

Диссертационное исследование направлено на решение фундаментальной научно-технической проблемы, а именно на определение требований к активному КА-сборщику, предназначенному для перелётов между объектами ККМ на низких орбитах с целью их увода на орбиты захоронения.

Все результаты, полученные соискателем в диссертации, имеют выраженную практическую направленность и являются теоретической базой для разработки технического предложения на проектирование КА-сборщика ККМ.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации в рамках мероприятия 1.2 федеральной целевой программы «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России на 2014 - 2020 годы» (Соглашение от 26 сентября 2017 года № 14.574.21.0146, шифр лота “2017-14-576-0041”).

Полученные результаты были включены в монографию научного консультанта А.А. Баранова "Маневрирование космических аппаратов в окрестности круговой орбиты", (Издательство «Спутник+», Москва, 2016, 512с) в рамках подготовки им докторской диссертации.

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 10 статей, из них 5 входят в базы данных Web of Science/Scopus, 10 – в список открытых изданий, рекомендованных ВАК РФ.

Перечень публикаций в открытых изданиях, рекомендованных ВАК РФ:

1. Баранов А.А., Гришко Д.А. Вопросы минимизации затрат суммарной характеристической скорости, необходимой для обслуживания и восполнения спутниковых систем на некомпланарных круговых орбитах // Наука и образование. 2013. №9. С. 289-312.
2. Баранов А.А., Гришко Д.А. Способы уменьшения энергетических затрат при облете элементов спутниковой группировки // Полёт. 2014. № 8 (8). С. 39-48.
3. Baranov A.A., Grishko D.A., Mayorova V.I. The features of constellations' formation and replenishment at near circular orbits in non-central gravity fields // Acta Astronautica, Vol. 116 (2015), pp. 307–317
4. Баранов А.А., Гришко Д.А. Баллистические аспекты облета крупногабаритного космического мусора на низких околокруговых орбитах // Известия Российской академии наук. Теория и системы управления. 2015. № 4. С. 160-171.
5. Baranov A.A., Grishko D.A. Ballistic Aspects of Large-Size Space Debris Flyby at Low Earth Near-Circular Orbits. Journal of Computer and Systems Sciences International, #4 (2015), pp. 639-650.
6. Баранов А.А., Гришко Д.А., Медведевских В.В., Латшин В.В. Диагональное решение задачи облёта объектов крупногабаритного космического мусора на солнечно-синхронных орбитах // Космические исследования. 2016. Т.54. №3. С. 242-250.
7. Baranov A.A., Grishko D.A., Medvedevskikh V.V., LapshinV.V. Solution of the Flyby Problem for Large Space Debris at Sun-Synchronous Orbit // Cosmic Research, Vol. 54, №3 (2016), pp. 229-236.
8. Баранов А.А., Гришко Д.А., Чернов Н.В. Облёт низкоорбитальных объектов крупногабаритного космического мусора с их последовательным уводом на орбиту захоронения // Наука и Образование. 2016. №4. С. 34-47.
9. Baranov A.A., Grishko D.A., Razoumny Y.N., Li Jun. Flyby of large-size space debris objects and their transition to the disposal orbits in LEO // Advances in Space Research, Vol. 59, 2017, pp. 3011–3022.
10. Baranov A.A., Grishko D.A., Razoumny Y.N. Large-size space debris flyby in low Earth orbits // Cosmic Research, Vol. 55, Issue 5, 2017 (in print).

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

1. International Astronautical Congress, International student workshop IAF-SUAC Tsinghua, Beijing, 2013;
2. XLVIII научные чтения памяти К.Э. Циолковского, Калуга, 2013;
3. XXXVIII академические чтения по космонавтике, Москва , 2014;
4. Российско-китайский инновационный студенческий форум по малым спутникам, Благовещенск, 2014;
5. XLIX научные чтения памяти К.Э. Циолковского, Калуга, 2014;
6. VI Белорусский космический конгресс, Минск, 2014;
7. Международная научная конференция «Физико-математические проблемы создания новой техники», посвященная 50 – летию НУК “Фундаментальные науки” МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, 2014;
8. XXXIX Академические чтения по космонавтике, Москва, 2015;

9. XI Всероссийский съезд по фундаментальным проблемам теоретической и прикладной механики, Казань, 2015
10. International Astronautical Congress, Jerusalem, 2015
11. XL Академические чтения по космонавтике, Москва , 2016;
12. International Astronautical Congress, Guadalajara, 2016
13. XLI Академические чтения по космонавтике, Москва, 2017;
14. 7th European Conference on Space Debris, Darmstadt, 2017.
15. 3rd IAA Conference on Dynamics and Control of Space Systems (DYCOSS), Moscow, 2017.
16. Семинар «Механика космического полета (имени В.А. Егорова)» кафедры «Теоретическая механика и мехатроника» Московского государственного университета им. М.В. Ломоносова под руководством д.ф.-м.н. профессора В.В. Сazonova. Москва, 23 ноября 2016 г.
17. Семинар кафедры "Теоретическая механика" МГТУ им. Н.Э. Баумана под руководством д.т.н. профессора И.Г. Благовещенского. Москва, 21 декабря 2016 г.
18. Семинар кафедры 601 Московского авиационного института под руководством д.т.н. профессора М.С. Константина. Москва, 09 июня 2017 г.
19. Семинар отдела №5 Института прикладной математики им. М.В. Келдыша РАН под руководством д.ф.-м.н. профессора Ю.Ф. Голубева. Москва, 21 сентября 2017 г.
20. International Astronautical Congress, Adelaide, 2017.

Специальность, которой соответствует диссертация

Диссертация Гришко Д.А. полностью соответствует паспорту специальности 01.02.01 – Теоретическая механика и охватывает область исследований "Прикладная небесная механика".

Диссертация к защите представляется впервые.

Вышесказанное даёт основание МГТУ им. Н.Э. Баумана *рекомендовать к защите* диссертацию Гришко Д.А. "Исследование схем облёта объектов крупногабаритного космического мусора на низких орбитах" на соискание учёной степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.02.01 – Теоретическая механика в диссертационном совете Д 002.024.01 при Федеральном государственном учреждении "Федеральный исследовательский центр Институт прикладной математики им. М.В. Келдыша Российской академии наук"

Заключение принято единогласно на заседании кафедры "Теоретическая механика" МГТУ им. Н.Э. Баумана. На заседании присутствовало 20 человек. Результаты голосования: "за" – 20 человек, "против" – нет, "воздержался" – нет, протокол № 14 от 24.05.2017

Шкапов Павел Михайлович
д.т.н., профессор,
Заведующий кафедрой «Теоретическая
механика»