

ОТЗЫВ

официального оппонента на диссертацию Гришко Дмитрия Александровича "Исследование схем облёта объектов крупногабаритного космического мусора на низких орбитах", представленную на соискание учёной степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.02.01 – Теоретическая механика

Диссертационная работа Д.А. Гришко посвящена исследованию схем облёта объектов крупногабаритного космического мусора на низких (высотой 600...1300 км) орбитах при решении проблемы увода этих объектов из области околоземного пространства, которая активно используется многими спутниковыми системами.

Актуальность.

Проблема очистки околоземного пространства от космического мусора является *актуальной* для сегодняшнего дня. Ситуация такова, что задержка в решении этой проблемы может привести к лавинообразному росту числа искусственных неуправляемых объектов из-за трудно прогнозируемых столкновений с образованием большого числа фрагментов. Эти фрагменты представляют большую опасность для космических аппаратов, рабочие орбиты которых располагаются в рассмотренной в диссертационной работе области околоземного пространства.

Диссертант анализирует проектно-баллистическую часть проблемы «уборки космического мусора». Конкретнее, для двух известных стратегий «борьбы с мусором» он анализирует целесообразные схемы облёта крупногабаритных объектов космического мусора с целью их увода на орбиты захоронения, на которых благодаря аэродинамическим возмущениям (аэродинамическому торможению) время существования космического объекта является ограниченным.

Автор диссертационной работы во введении чётко описал текущее состояние проблемы «космического мусора», привёл ссылки на существующие директивные документы, направленные на решение этой проблемы. Он показал, что нахождение рациональных схем облёта крупногабаритных объектов космического мусора является необходимым элементом решения *актуальной* проблемы борьбы с космическим мусором.

Научные положения, выводы и рекомендации, сформулированные в диссертации.

Степень их обоснованности.

1) Диссертант проанализировал существующие крупногабаритные объекты космического мусора (использованные разгонные блоки и верхние ступени ракет-носителей), располагающиеся на орбитах в диапазоне высот 600-1300 км. Выявил 5 компактных групп этих объектов. Обосновал целесообразность разработки космических средств борьбы с объектами каждой из 5-и групп, предполагая облёт одним КА объектов только одной группы для увода этих объектов или их значительной части на орбиты захоронения. Анализ элементов орбит объектов космического мусора каждой группы подтверждает обоснованность предложенной в работе классификации.

2) Диссертант представил методику определения затрат суммарной характеристической скорости манёвра перелёта между объектами крупногабаритного космического мусора, находящимися на некомпланарных околокруговых орбитах. Методика основана на оценках прецессии плоскости орбиты из-за второй зональной гармоники земного потенциала, на оптимизации аргумента широты места приложения импульса скорости, имеющего трансверсальную и бинормальную составляющие. Очень широко и обоснованно используется теория перелёта между околокруговыми орбитами, активно развиваемая научным консультантом диссертанта А.А. Барановым.

3) Диссертант проанализировал схему увода космического мусора, при которой КА-платформа имеет несколько отделяемых модулей. Эти модули фиксируются на объекте космического мусора и должны обеспечить его увод из очищаемой области пространства на орбиты захоронения. Такая стратегия «борьбы с мусором» названа первым вариантом увода космического мусора. Диссертант разработал методику уменьшения суммарной характеристической скорости манёвра при облёте объектов космического мусора внутри группы за приемлемое время.

4) Диссертант проанализировал схему увода космического мусора, при которой КА последовательно стыкуется с космическим мусором, уводит его на орбиту захоронения с использованием собственной двигательной установки, чтобы затем стыковаться и уводить на орбиту захоронения следующий объект рассматриваемой группы космического мусора. Такая стратегия «борьбы с мусором» в диссертации названа вторым вариантом увода космического мусора. Диссертант разработал методику оптимизации схемы последовательного облёта космическим аппаратом объектов космического мусора одной

группы. Критерием оптимизации выступает суммарная характеристическая скорость манёвра при последовательном облёте объектов мусора.

5) Диссертант представил сравнение вариантов увода объектов космического мусора по требуемой суммарной характеристической скорости, по времени облёта объектов мусора одной группы и по количеству дозаправок КА-платформы топливом и отделяемыми модулями. Не ставя под сомнение результаты такого сравнения, ниже (в списке замечаний) будет приведено соображение, которое, на мой взгляд, целесообразно было учитывать для более корректного сравнения рассматриваемых вариантов «борьбы с космическим мусором».

6) Диссертант выработал рекомендации по рациональным схемам облёта объектов крупногабаритного космического мусора каждой из рассмотренных пяти групп. Эти рекомендации можно использовать для проектно-баллистического анализа транспортной системы, при анализе её рациональных характеристик.

Новизна полученных результатов, выводов и рекомендаций, сформулированных в диссертации. Их достоверность.

Рациональность анализируемых в диссертации схем облёта объектов космического мусора связана, прежде всего, с идеей максимального использования прецессии орбитальной плоскости, вызываемой второй зональной гармоникой гравитационного потенциала Земли. Характеристики схемы перелёта (например, элементы орбиты ожидания) выбираются так, чтобы изменение долготы восходящего узла, вызываемое второй зональной гармоникой, обеспечило благоприятные условия перелёта между орбитами. При этом введённый диссертантом портрет эволюции отклонений долгот восходящих узлов орбит объектов космического мусора позволяет автору находить рациональную стратегию облёта этих объектов. Использование второй зональной гармоники позволяет экономить топливо для совершения рассматриваемых в диссертации межорбитальных перелетов.

Соглашаюсь с утверждением автора диссертации о том, что, по-видимому, задача облёта объектов крупногабаритного космического мусора в отечественной научной литературе ранее не рассматривалась. То решение (характеристики схем облёта), которое приведено в диссертационном исследовании, является новым научным результатом, полученным диссертантом.

Характерной особенностью диссертационной работы Д.А. Гришко является относительная простота и наглядность разработанной им модели, позволяющей анализировать и оптимизировать схемы облёта объектов космического мусора. Благодаря малой эллиптичности орбит исследуемых объектов космического мусора, допущению о малой эллиптичности орбит перелёта между этими объектами и импульсной аппроксимации активных участков траектории математические модели, описывающие движение КА и объектов космического мусора, не содержат дифференциальных уравнений. Диссертант анализирует движение, используя аналитические и полуаналитические модели. При этом схема единичного перелёта между орбитами характеризуется небольшим набором параметров этой схемы. Считаю, что такой подход является правильным. Он позволяет на этапе технического предложения и эскизного проектирования корректно формулировать требования к космической транспортной системе.

Кроме перечисленного рассматриваю как новые следующие результаты работы.

- Зависимости, позволяющие определить характеристики схемы перелёта между некомпланарными орбитами объектов космического мусора, компромиссные по затратам характеристической скорости и времени перелёта.
- Предложенные автором две принципиально различные схемы облёта объектов космического мусора (по терминологии автора, «последовательная» и «диагональная») при использовании первого варианта увода крупногабаритного космического мусора.
- Результаты исследования некомпланарного перелёта между объектами космического мусора с использованием орбиты ожидания. Показана возможная целесообразность коррекции наклона перелётной орбиты для изменения скорости прецессии орбиты.
- Сравнительный анализ рассмотренных вариантов увода крупногабаритного космического мусора.

Все перечисленные в отзыве научные результаты представляются **достоверными**. Достоверность полученных результатов подтверждается использованием корректных математических моделей, описывающих движение КА в гравитационном поле Земли с учетом второй зональной гармоники, использованием методов анализа импульсных межорбитальных перелетов.

Практическая значимость полученных автором результатов

Работа автора имеет теоретический характер и направлена на решение важной для практики проблемы борьбы с космическим мусором. Она позволяет на основе методов теоретической механики определить требования к космической транспортной системе, обеспечивающей облёт объектов крупногабаритного космического мусора (использованных разгонных блоков и верхних ступеней ракет-носителей) и их увод из околоземной области, активно используемой многими космическими системами (области высот 600- 1300 км).

Замечания к тексту диссертации

1. При представлении портрета эволюции отклонений долгот восходящих узлов (рисунки 8-12) не указывается, относительно какого объекта космического мусора этот портрет нарисован. Если относительно всех, то линий на рисунке должно быть существенно больше.
2. Параметры манёвров КА на околокруговых орбитах находятся в результате решения линеаризованных дифференциальных уравнений. Соглашаясь с такой возможностью, хотелось бы иметь оценку точности используемых решений.
3. В условиях существования двух критериев оценки схемы перелета (характеристической скорости и времени перелета) введение компромиссного решения понятно и обосновано. Но, с моей точки зрения, придумывание этого компромисса (например, по оценке производной характеристической скорости по времени перелета, или по коэффициенту штрафа в формулах на странице 74) вносит в исследование некоторый элемент неопределённости. Было бы правильней, как решение рассматривать саму зависимость затрат характеристической скорости от времени перелёта для каждого элементарного перелета. И всю схему облёта объектов мусора выбирать по критерию минимизации характеристической скорости для заданного суммарного времени перелёта. Понимая, что такая задача является весьма трудной, я соглашаюсь с оценками, которые получает диссертант, используя предлагаемое им компромиссное решение. Но считаю, что полученные в диссертации решения по схемам обслуживания можно улучшить.
4. Автор рассматривает схемы перелёта, предполагая, что все перелётные орбиты и орбиты ожидания являются околокруговыми. Наверно, это обосновано характеристиками орбит рассматриваемых объектов космического мусора. Но вопрос о том, что в каких-то случаях может быть целесообразным: использование

эллиптических перелётных орбит или орбит ожидания, – остается, на мой взгляд, открытым.

5. При рассмотрении схемы перелёта с орбитой ожидания автор постулирует двух-импульсный переход КА на орбиту ожидания и двух-импульсный переход с орбиты ожидания на орбиту объекта космического мусора. При этом не исследуется возможность использования одноимпульсного перелёта на орбиту ожидания и схода с неё.
6. Проводимое сравнение первого и второго вариантов увода объектов космического мусора не совсем корректно. Автор не учитывает требуемую энергетику специального модуля, который крепится к объекту мусора (в первом варианте), для увода его из очищаемой области околоземного пространства. В то время, как во втором варианте суммарный импульс скорости рассчитывается с учетом увода мусора на орбиту захоронения.
7. Приведённый в работе результат анализа облёта космического мусора при использовании первого варианта его увода для 5-ой группы показал, что использование диагональных решений уменьшает требуемую энергетику в 4 раза. Возникает такое соображение: нельзя ли для, например, 1-ой группы мусора ввести специальные орбиты ожидания, перелёт на которые осуществлять с использованием диагональных решений. И за счёт этого уменьшить требуемую энергетику облёта мусора.
8. Автор ограничивает себя крупногабаритными объектами космического мусора, не включая в их число нефункционирующие космические аппараты. Основания для этого существуют: габариты космических аппаратов, как правило, существенно меньше габаритов разгонных блоков и верхних ступеней ракет-носителей. Но может оказаться целесообразным обеспечивать увод с орбит одной космической платформой и использованных элементов транспортной системы, и нефункционирующих КА. Поэтому в дальнейших исследованиях целесообразно расширить группы объектов космического мусора.
9. Автор очень часто анализирует функции двух переменных (например, зависимость характеристической скорости от рассогласования по долготе восходящего узла и наклонения). При этом всегда изменение одного из аргументов функции откладывается по оси абсцисс, и рисуется семейство кривых по второму аргументу. В громадном большинстве случаев более наглядным было бы воспользоваться изолиниями

