



Государственная корпорация
по космической деятельности «Роскосмос»

Государственный научный центр Российской Федерации –
федеральное государственное унитарное предприятие

**«Исследовательский центр
имени М.В.Келдыша»**

(ГНЦ ФГУП «Центр Келдыша»)

Онежская ул, д. 8, Москва, Россия, 125438
Тел. +7 (495) 456-4608 Факс: +7 (495) 456-8228
ОКПО 07547339 ОГРН 1027700482303 ИНН/КПП 7711000836/774301001
kerc@elnet.msk.ru; http://www.kerc.msk.ru

0302.2020 № 48-24/1

на № 034-06-653 от 19.11.2019

Ученому секретарю
диссертационного совета Д212.125.12
Федерального бюджетного
образовательного учреждения
высшего образования
«Московский авиационный институт
(национальный исследовательский
университет)» (МАИ)
кандидату технических наук,
Старкову А.В.

Волоколамское ш., 4, А-80, ГСП-3,
г. Москва, Россия, 125993

Уважаемый Александр Владимирович!

Направляю Вам отзыв официального оппонента Сеницына А.А. на диссертационную работу Старченко Александра Евгеньевича «Траектории многовитковых перелетов космических аппаратов с минимальной радиационной нагрузкой», представленную на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.07.09 - «Динамика, баллистика, управление движением летательных аппаратов».

Приложение: отзыв на 7 л. в 2 экз., н/с

Ученый секретарь
кандидат военных наук

Ю.Л. Смирнов

Исполнитель: Сеницын А.А.
тел. +7(495)456-93-13 (доб. 5-86)

Отдел документационного
обеспечения МАИ

Вх. № 7
«05» 02 2020

Отзыв официального оппонента Синицына А.А.

на диссертационную работу Старченко А.Е. «Траектории многовитковых перелетов космических аппаратов с минимальной радиационной нагрузкой», представленную на соискание научной степени кандидата технических наук по специальности 05.07.09 - «Динамика, баллистика, управление движением летательных аппаратов»

Диссертационная работа посвящена оптимизации траекторий многовитковых перелетов на геостационарную орбиту (ГСО), обеспечивающих минимальную радиационную нагрузку на элементы КА. Целью диссертационной работы было исследование возможностей снижения радиационной нагрузки в таких перелетах.

Актуальность избранной темы.

Использование электроракетных двигательных установок (ЭРДУ) для выведения на геостационарную орбиту на сегодняшний день рассматривается большинством разработчиков КА в качестве варианта повышения эффективности транспортной операции и, как следствие, повышение эффективности работы КА. Анализ траекторий выведения геостационарных КА, использовавших ЭРДУ для осуществления транспортной операции, показывает, что имеет место тенденция к увеличению доли работы ЭРДУ (увеличивается энергетика перелета с малой тягой, а начальная для ЭРДУ орбита оказывается все ниже). Дальнейшее наращивание доли работы ЭРДУ будет приводить к возрастанию влияния факторов космического пространства, среди которых — воздействие корпускулярного излучения радиационных поясов Земли на полупроводниковую аппаратуру и фотоэлектрические преобразователи солнечных батарей.

Одной из возможностей парирования воздействия радиационной нагрузки на системы КА является выбор траектории перелета. К настоящему времени баллистические возможности снижения радиационной нагрузки изучены недостаточно (хотя публикации научных работ по этому направлению появляются, что косвенно подтверждает интерес к проблеме). В связи с вышесказанным тема диссертационной работы является актуальной.

Отдел документационного
обеспечения МАИ

Вх. № 05-02 2020

Обоснованность научных положений, выводов и рекомендаций.

Работа содержит введение, три главы и заключение. Разбиение соответствует традиционному стилю изложения: постановка задачи, математическая модель, результаты расчетов и выводы. Список литературы включает ссылки на 135 научно-технических публикаций.

Во введении приводится хороший обзор по теме диссертационной работы. На основе анализа результатов и методологии приводимых в обзоре работ обосновываются цель работы и ее задачи. Здесь же сформулированы научная новизна, практическая значимость, результаты, выносимые на защиту, и другие необходимые признаки диссертационной работы.

В первой главе приводится математическая формулировка решаемых задач. Для описания модели движения КА выбраны равноденственные оскулирующие элементы с истинной долготой в качестве быстрой переменной. Радиационная нагрузка добавляется к уравнениям движения в качестве дополнительного дифференциального уравнения для вновь вводимой переменной, причем форма записи уравнения для этой переменной общая для обоих видов рассматриваемой в работе радиационной нагрузки. Следует отметить продемонстрированную в работе возможность получения решения дифференциального уравнения для сопряженной радиационной нагрузке в виде выражения через начальное значение этой сопряженной и начальной и текущей величин радиационной нагрузки. Приводится формулировка краевой задачи при использовании принципа максимума Л.С. Понтрягина для определения законов ориентации вектора тяги.

Рассматриваются возможные функционалы (продолжительность перелета, радиационная нагрузка), отмечается многокритериальный характер оптимизационной задачи. Определяется рациональная постановка задачи — минимизация продолжительности выведения при заданном уровне радиационной нагрузки. По последней переменной строится методология продолжения по параметру (начиная от задачи быстрогодействия).

Отдельно рассмотрен важный случай околоразностного движения. Осредненная математическая модель уравнений движения (аналогична приведенной в известной монографии В.Н. Лебедева) дополнена уравнением для радиационной нагрузки.

Содержание второй главы составляет описание моделей для расчета радиационной нагрузки от радиационных поясов Земли. Отдельно рассматриваются два варианта переменных радиационной нагрузки — поглощенная доза в кремниевом элементе (радиационная нагрузка на электронную аппаратуру) и относительная мощность солнечных батарей (СБ) на конец срока активного существования (САС) КА (либо эквивалентный флюенс нормально падающих электронов с энергией 1 МэВ). Для расчета первого варианта использована стандартная программа Shieldose2. Вторым вариантом — расчет проводился по методу эквивалентного потока с использованием стандартных программ EQGAFLUX (в модифицированном варианте) и EQFRUX и экспериментальных зависимостей падения мощности от эквивалентного флюенса нормально падающих электронов с энергией 1 МэВ.

Помимо проблемы выбора модели из различных стандартных, их использование при интегрировании уравнений движения приводит к вычислительной неэффективности (значительному росту количества шагов интегрирования). Для преодоления этого в работе разработаны модели радиационных нагрузок (для обоих вариантов), основанные на осреднении радиационной нагрузки для набора круговых орбит и построении аппроксимационных сплайнов. При этом трехмерная модель радиационных нагрузок заменяется двумерной (вместо координат точки — радиус и наклонение). В работе описываются построенные на основе различных стандартных моделей радиационных поясов Земли четыре аппроксимационные модели поглощенной дозы и две аппроксимационные модели для расчета эквивалентного потока для кремниевых и трехкаскадных гетероструктурных фотоэлектрических преобразователей (ФЭП).

Для расчета относительной мощности гетероструктурных трехкаскадных СБ на конец САС найденная математическая формулировка позволяет обойтись без расчета эквивалентного флюенса. Вместо этого численно интегрируется непосредственно относительная мощность СБ на конец САС (более медленно меняющаяся переменная по сравнению с эквивалентным флюенсом).

Третья глава включает в себя результаты применения разработанного программно-методического аппарата. В частности, рассматривается задача

оптимизации траектории выведения КА с ядерной электроракетной двигательной установкой с достаточно низкой радиационно безопасной орбиты на ГСО. При этом исследуется вопрос возможностей сокращения поглощенной дозы кремниевым чувствительным элементом за период выведения за счет изменения траектории движения КА. Отдельно рассмотрен случай движения по околокруговым орбитам, описываемый приближенной моделью движения. Помимо полученных результатов, иллюстрирующих баллистические возможности сокращения поглощенной дозы, в главе содержатся верификационные расчеты, подтверждающие адекватность принятых расчетных моделей. Также приводится сопоставление по массовым затратам в рассматриваемом численном примере для вариантов снижения поглощенной дозы за счет изменения траектории и за счет увеличения толщины стенок защитного корпуса чувствительного элемента.

Другой задачей, рассмотренной в третьей главе, является сокращение радиационной деградации СБ в перелете КА с эллиптической промежуточной орбиты на ГСО. Отдельно анализировались варианты формирования СБ на основе кристаллического кремния и многокаскадных гетероструктурных ФЭП. Рассматривался набор промежуточных орбит, отличающихся параметрами (апоцентр, перицентр, наклонение). Так же как и для предыдущей задачи наряду с расчетами, иллюстрирующими возможности снижения радиационной деградации, приводятся верификационные расчеты. Применительно к случаю СБ на основе трехкаскадных гетероструктурных ФЭП дополнительно исследовалось влияние начальной величины аргумента перицентра на характеристическую скорость перелета и относительную мощность СБ. Приведен пример сопоставления баллистических возможностей снижения радиационной деградации СБ в сравнении с изменением толщины лицевого защитного стекла. Приводится сравнение различных способов расчета траектории (с использованием приема осреднения и без) и моделей расчета радиационной деградации СБ (по стандартной модели, по сглаженной модели на основе аппроксимации сплайнами) по вычислительной эффективности (сравниваются количество шагов интегрирования и количество обращений к процедуре расчета правых частей дифференциальных уравнений движения).

Новизна результатов.

Среди новых результатов можно отметить следующие:

1. Методический подход к оптимизации траекторий выведения КА на ГСО с применением ЭРДУ, отличиями которого являются использование не прямых методов оптимизации (принципа максимума Л.С. Понтрягина) и выбор в качестве одного из функционалов величины радиационной нагрузки на элементы КА (поглощенная доза; относительная мощность СБ на конец САС; эквивалентный флюенс нормально падающих электронов с энергией 1 МэВ);
2. Разработка моделей для расчета поглощенной дозы и эквивалентного флюенса нормально падающих электронов с энергией 1 МэВ, обеспечивающих гладкость правых частей дифференциальных уравнений, и, в итоге, улучшающих вычислительную эффективность;
3. Характер (качественная зависимость) изменения параметров траектории выведения КА на ГСО при замене задачи быстрогодействия на задачу быстрогодействия с ограничением на величину радиационной нагрузки.

Достоверность.

Достоверность полученных результатов обеспечивается корректностью постановки задач оптимизации и применения известных методов, использованием стандартных программ в составе программного комплекса, проведенными верификационными исследованиями, сопоставлением отдельных результатов с доступными результатами других авторов.

Практическая значимость результатов диссертации заключается в возможности использования созданного программно-методического аппарата для решения различных задач межорбитальной транспортировки КА с ЭРДУ в околоземном пространстве. Также важным для практики являются примеры результатов расчетов, иллюстрирующих возможности снижения радиационной нагрузки в многовитковом перелете на ГСО за счет вариации траектории выведения.

Автореферат диссертации в достаточной мере отражает ее содержание.

Материалы диссертации опубликованы в ведущих отечественных научно-технических изданиях, докладывались на конференциях и семинарах.

Замечания.

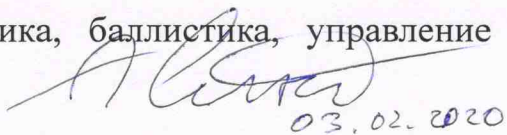
1. В работе не рассматривается возможная постановка оптимизационной задачи, в которой вся располагаемая мощность СБ определяет тягу ЭРДУ. В этом случае тяга ЭРДУ будет уменьшаться за счет деградации СБ на траектории выведения.
2. Некоторые методические положения заслуживают большего внимания в тексте диссертации. В частности, использование явной зависимости массы от времени вместо дифференциального уравнения делает уравнения движения автономными. Несмотря на то, что размерность интегрируемой системы сокращается, становится невозможно использовать свойство постоянства гамильтониана для контроля над вычислениями. Другим методическим моментом, требующим расширенных комментариев в тексте, является приравнивание нулю сопряженной истинной долготы на всей траектории движения. Такой инженерный прием позволяет не касаться проблемы неединственности экстремалей (по быстрдействию) в зависимости от истинной долготы, однако обратной стороной является невозможность исследования отличий экстремалей по радиационным нагрузкам.
3. Хотя в целом диссертационная работа оформлена на хорошем уровне (а ее электронная версия содержит интерактивные ссылки на формулы и литературу), в оформлении имеются отдельные недочеты. Например, в выражении (1.26) на стр. 22 присутствует операция деления на вектор. На стр. 60 приводится рис. 3.8, а ссылка на него в тексте на стр. 57 в другой главе. В тексте иногда встречаются опечатки.

Указанные замечания не снижают общую положительную оценку диссертационной работы. Автор при выполнении диссертационного исследования показал глубокие знания в вопросах баллистики и моделирования радиационных нагрузок на элементы КА, а также проявил высокий уровень математической культуры.

Заключение.

Диссертационная работа соответствует всем требованиям «Положения о порядке присуждения ученых степеней», предъявляемых к диссертациям на соискание ученой степени кандидата технических наук, а ее автор — Старченко Александр Евгеньевич — заслуживает присуждения ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.07.09 «Динамика, баллистика, управление движением летательных аппаратов».

Ведущий научный сотрудник отдела 20 ГНЦ ФГУП «Центр Келдыша», кандидат технических наук по специальностям 05.07.05 – «Тепловые, электроракетные двигатели и энергоустановки летательных аппаратов» и 05.07.09 – «Динамика, баллистика, управление движением летательных аппаратов»



А.А. Синицын

03.02.2020

Почтовый адрес: 125438, г. Москва, Россия, ул. Онежская, д. 8.
Контактный телефон: +7(495)456-93-13 (доб. 5-86)
Адрес электронной почты: Sinitsin@KeRC.msk.ru

Подпись Синицына А.А. удостоверяю

Ученый секретарь

ГНЦ ФГУП «Центр Келдыша»

кандидат военных наук



Ю.Л. Смирнов