

СВЕДЕНИЯ О РЕЗУЛЬТАТАХ ПУБЛИЧНОЙ ЗАЩИТЫ

Диссертационный совет: Д 212.125.10

Соискатель: Жумаев Зайнулла Серикович

Тема диссертации: Методика проектирования наноспутника с солнечной энергодвигательной установкой

Специальность: 05.07.02 – Проектирование, конструкция и производство летательных аппаратов

Решение диссертационного совета по результатам защиты диссертации:

На заседании 26 апреля 2022 года диссертационный совет пришел к выводу о том, что диссертация представляет собой научно-квалификационную работу, соответствующую критериям, установленным положением о присуждении ученых степеней, утвержденным постановлением Правительства Российской Федерации от 24 сентября 2013 года №842, и принял решение присудить Жумаеву Зайнулле Сериковичу ученую степень кандидата технических наук.

Присутствовали: председатель диссертационного совета, д.т.н., проф. Денискин Ю.И.; заместитель председателя, д.т.н., проф. Бойцов Б.В.; ученый секретарь диссертационного совета, к.т.н., доц. Денискина А.Р.; д.т.н., доц. Долгов О.С.; д.т.н., проф. Дудченко А.А.; д.т.н., проф. Комков В.А.; д.т.н., проф. Куприков М.Ю.; д.т.н., проф. Лисейцев Н.К.; д.т.н., проф. Подколзин В.Г.; д.ф.-м.н., проф. Рабинский Л.Н.; д.т.н., доц. Рахманов М.Л.; д.т.н., проф. Сидоренко А.С.; д.т.н., проф. Туркин И.К.; д.т.н., проф. Ушаков А.Е.; д.т.н., проф. Фирсанов В.В.; д.т.н., проф. Шайдаков В.И.

Председатель
диссертационного совета Д 212.125.10
д.т.н., профессор

Ю.И. Денискин

Учёный секретарь
диссертационного совета Д 212.125.10
к.т.н., доцент

А.Р. Денискина

Начальник
Т.А. А...



ЗАКЛЮЧЕНИЕ ДИССЕРТАЦИОННОГО СОВЕТА Д 212.125.10,
СОЗДАННОГО НА БАЗЕ ФЕДЕРАЛЬНОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО
БЮДЖЕТНОГО ОБРАЗОВАТЕЛЬНОГО УЧРЕЖДЕНИЯ ВЫСШЕГО
ОБРАЗОВАНИЯ «МОСКОВСКИЙ АВИАЦИОННЫЙ ИНСТИТУТ
(НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ)»
МИНИСТЕРСТВА НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ
ФЕДЕРАЦИИ, ПО ДИССЕРТАЦИИ НА СОИСКАНИЕ УЧЕНОЙ СТЕПЕНИ
КАНДИДАТА НАУК

аттестационное дело № _____
решение диссертационного совета от 26 апреля 2022 г. протокол № 10

О присуждении **Жумаеву Зайнулле Сериковичу**, гражданину Российской Федерации, учёной степени кандидата технических наук.

Диссертация «Методика проектирования наноспутника с солнечной энергодвигательной установкой» по специальности 05.07.02 «Проектирование, конструкция и производство летательных аппаратов» принята к защите 22 февраля 2022 г. (протокол заседания № 6) диссертационным советом Д 212.125.10, созданным на базе федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)» Министерства науки и высшего образования Российской Федерации, 125993, г. Москва, Волоколамское шоссе, д.4, А-80, ГСП-3, приказ о создании диссертационного совета № 714/нк от 02 ноября 2012 г.

Соискатель Жумаев Зайнулла Серикович, 22 января 1990 года рождения.

Жумаев Зайнулла Серикович в 2013 году с отличием окончил федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана» по специальности 24.03.01 «Космические летательные аппараты и разгонные блоки». Во время подготовки диссертации, в период с 2013 г. по 2017 г., проходил обучение в очной аспирантуре федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана (национальный исследовательский университет)» на кафедре «Аэрокосмические системы» (СМ-2) по направлению подготовки 24.06.01 «Авиационная и ракетно-космическая техника», специальность – «Проектирование, конструкция и производство летательных аппаратов», работал по совместительству в должности инженера-конструктора, ведущего инженера-конструктора, руководителя направления, директора по продажам в

обществе с ограниченной ответственностью «Спутниковые инновационные космические системы» (ООО «СПУТНИКС»).

В настоящее время соискатель работает в должности разработчика-исследователя в акционерном обществе «Инфовотч» и по совместительству инженером на кафедре СМ-2 «Аэрокосмические системы» в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана (национальный исследовательский университет)».

Диссертация выполнена на кафедре СМ-2 «Аэрокосмические системы» федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана (национальный исследовательский университет)».

Научный руководитель – доктор технических наук, профессор, **Щеглов Георгий Александрович**, профессор кафедры СМ-2 «Аэрокосмические системы» федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана (национальный исследовательский университет)».

Официальные оппоненты:

Геча Владимир Яковлевич, доктор технических наук, профессор, заместитель генерального директора по научной работе акционерного общества «Научно-производственная корпорация «Космические системы мониторинга, информационно-управляющие и электромеханические комплексы» имени А.Г. Иосифьяна»;

Абдурахимов Алексей Александрович, доктор технических наук, профессор, начальник кафедры космических аппаратов и средств межорбитальной транспортировки федерального государственного бюджетного военного образовательного учреждения высшего образования «Военно-космическая академия имени А.Ф. Можайского» министерства обороны Российской Федерации

дали положительные отзывы на диссертацию.

Ведущая организация, акционерное общество «Центральный научно-исследовательский институт машиностроения» (АО «ЦНИИмаш»), в своём положительном отзыве, подписанном кандидатом технических наук, инженером 1-й категории отдела 10401 «Технологии создания ключевых элементов служебных систем АКСК и технологий обеспечения стойкости к ВВФ» А.А. Маленковым и кандидатом технических наук, заместителем начальника Центра автоматических космических систем и комплексов Е.М. Твердохлебовой, и утверждённом доктором технических наук,

профессором, Генеральным конструктором по автоматическим космическим системам и комплексам – заместителем генерального директора В.В. Хартовым, указала, что диссертационная работа является завершённой научно-квалификационной работой, выполненной автором самостоятельно, на высоком уровне и содержащей результаты, обладающие научной новизной и практической значимостью.

Отмечено, что диссертация содержит новые научные результаты в области комплексного проектирования маневрирующего наноспутника (спутник массой от 1 до 10 кг) с солнечной энергодвигательной установкой, который позволит увеличить эффективность использования спутника в составе многоспутниковой группировки за счёт увеличения зоны покрытия, достигаемого быстрым построением созвездия спутников, что, имеет значение для ракетно-космической отрасли.

В рамках разработанной методики впервые предложена новая схема космического аппарата (КА) с солнечной энергодвигательной установкой (СЭДУ), которая отличается прямым нагревом рабочего тела солнечным излучением с использованием линзы Френеля. Предложенная схема маневрирующего КА позволит значительно сократить сроки построения созвездий спутников для обеспечения глобального покрытия. Подчёркнута практическая ценность диссертации для расчёта проектных параметров для КА нано-, микро-, мини- классов, которые используют СЭДУ в качестве двигательной установки. Результаты диссертационной работы используются в учебном процессе на кафедре «Аэрокосмические системы» МГТУ им. Н.Э. Баумана. Также разработанная методика расчёта была использована при проектировании сверхмалого разгонного блока в рамках конкурса концепций сверхлёгких средств выведения, организованного АНО «Аналитический центр «Аэронет». Результаты диссертации могут быть полезны для организаций-разработчиков малых КА: АО «РКЦ «Прогресс», АО «ИСС» им. М.Ф. Решетнева», АО «Корпорация «ВНИИЭМ», АО «НПО Лавочкина».

Работа отвечает требованиям пунктов 9-14 «Положения о присуждении учёных степеней», утверждённого Постановлением Правительства Российской Федерации от 24.09.2013 г. № 842, предъявляемым к диссертациям на соискание учёной степени кандидата наук, а её автор, Жумаев Зайнулла Серикович, заслуживает присуждения учёной степени кандидата технических наук по специальности 05.07.02 «Проектирование, конструкция и производство летательных аппаратов».

Соискатель имеет 14 научных работ в области проектирования космических аппаратов, в том числе по теме диссертации опубликовано 9 работ, из них в

рецензируемых научных изданиях опубликовано 3 работы, 1 – в издании, индексируемом в Scopus и Web of Science.

Научные публикации соискателя посвящены:

– проработке пневмогидросхемы СЭДУ с капиллярной системой подачи, построению математической модели СЭДУ;

– разработке компоновочной схемы кубсата форм-фактора 6U с СЭДУ, построению связной математической модели наноспутника с СЭДУ и оценке взаимовлияния работы основных подсистем, таких как СЭДУ, система ориентации и стабилизации, система энергопитания;

– численному интегрированию уравнений математической модели и разработке соответствующего программного комплекса;

– разработке алгоритма фазирования созвездия наноспутников.

В диссертации отсутствуют недостоверные сведения об опубликованных соискателем учёной степени работах.

Наиболее значимые научные работы по теме диссертации:

Перечень работ, рецензируемых ВАК:

1. **Жумаев, З.С.** Анализ проектных параметров солнечной энергодвигательной установки для наноспутника / З.С. Жумаев // Известия высших учебных заведений. Машиностроение. – 2012. – № 12. – С. 59-65. (0,44 п.л.).

2. Жаренов, И.С., **Жумаев, З.С.** Система обеспечения теплового режима микроспутника «ТаблетСат-Аврора»: проектирование и лётная отработка / И.С. Жаренов, З.С. Жумаев // Вестник Московского авиационного института. – 2015. – Т. 22. – № 3. – С. 63-75. (0,81 п.л./0,41 п.л.).

3. **Жумаев, З.С.** Математическая модель маневрирующего наноспутника с гелиотермической двигательной установкой и маховичной системой ориентации и стабилизации / З.С. Жумаев // Инженерный журнал: наука и инновации. – 2021. – № 5. – 23 с. (1,44 п.л.).

Работы, входящие в международные реферативные базы данных и системы цитирования Scopus, Web of Science:

4. **Zhumaev Z.S., Shcheglov G.A.** Operations dynamics analysis of solar thermal propulsion for CubeSats // Advances in Space Research. 2019. V. 64, № 4. P. 815-823. (0,56 п.л./0,35 п.л.).

Прочие публикации:

5. **Жумаев, З.С., Щеглов, Г.А.** Математическое моделирование солнечной энергодвигательной установки для наноспутника / З.С. Жумаев, Г.А. Щеглов // Необратимые процессы в природе и технике: Труды Седьмой Всероссийской конференции 29-31 января 2013 г. – Москва : МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2013. – Ч.II. – С. 213-216. (0,13 п.л./0,07 п.л.).

6. **Жумаев, З.С., Щеглов, Г.А.** Математическое моделирование работы солнечной энергодвигательной установки наноспутника / З.С. Жумаев, Г.А. Щеглов // XL Академические чтения по космонавтике, посвященные памяти академика С.П. Королёва и других выдающихся отечественных ученых-пионеров освоения космического пространства: сборник тезисов: Москва 26-29 января 2016 г. – С.56-57. (0,13 п.л./0,07 п.л.).

7. **Жумаев, З.С., Щеглов, Г.А.** Анализ динамики функционирования солнечной энергодвигательной установки для наноспутников типа CubeSat / З.С. Жумаев, Г.А. Щеглов // Научное наследие и развитие идей К.Э. Циолковского. Материалы 54-х Научных чтений памяти К.Э. Циолковского, 18-19 сентября Калуга: Изд-во АКФ «Политоп», 2019. – Ч.1. – С.66-68. (0,19 п.л./0,10 п.л.).

8. **Жумаев, З.С., Щеглов, Г.А.** Математическая модель для выбора проектных параметров наноспутника типа CubeSat с солнечной энергодвигательной установкой / З.С. Жумаев, Г.А. Щеглов // XLV Академические чтения по космонавтике, посвящённые памяти академика С.П. Королёва и других выдающихся отечественных ученых-пионеров освоения космического пространства: Сборник тезисов в 4 т. Москва, 30 марта – 2 апреля 2021. – Т.4. – С. 350-352. (0,19 п.л./0,10 п.л.).

9. **Жумаев, З.С.** Повышение производительности созвездия кубсатов за счёт быстрого фазирования в созвездие с использованием СЭДУ / З.С. Жумаев // Научное наследие и развитие идей К.Э. Циолковского. Материалы 56-х Научных чтений памяти К.Э. Циолковского, 21-23 сентября Калуга. – в 2-х частях: Изд-во АКФ «Политоп», 2021. – Ч.1. – С.66-68. (0,19 п.л.).

На диссертацию и автореферат поступили отзывы. В поступивших отзывах отмечена актуальность темы диссертационной работы, дан краткий анализ работы, отмечены новизна и достоверность полученных результатов, а также их практическая значимость и рекомендации по использованию результатов. Все отзывы положительные.

Отзыв на диссертацию ведущей организации – акционерного общества «Центральный научно-исследовательский институт машиностроения» (АО «ЦНИИмаш»).

Отзыв положительный. Имеются замечания:

1) Методику выбора наиболее подходящей двигательной установки можно детализировать, построив весовую функцию, зависящую от параметров движителей. Также желательно учитывать стоимость разработки и изготовления.

2) В работе не проводился анализ возможности построения предлагаемого наноспутника на отечественной элементной базе.

3) В работе не представлены расчёты режимов работы солнечной энергодвигательной установки с другими экологичными рабочими телами, такими как водный раствор спирта, который снизит риски замерзания рабочего тела.

Указанные замечания имеют рекомендательный характер и не сказываются на общей оценке качества работы. Принципиальных замечаний по существу работы нет. Цель исследования достигнута, диссертация удовлетворяет всем критериям, установленным «Положением о присуждении учёных степеней», утверждённым постановлением Правительства Российской Федерации от 24 сентября 2013 г. №842, а её автор – Жумаев Зайнулла Серикович – заслуживает присуждения ему учёной степени кандидата технических наук по специальности 05.07.02 «Проектирование, конструкция и производство летательных аппаратов».

Отзыв на диссертацию официального оппонента Гечи Владимира Яковлевича – доктора технических наук, профессора, заместителя генерального директора по научной работе акционерного общества «Научно-производственная корпорация «Космические системы мониторинга, информационно-управляющие и электромеханические комплексы» имени А.Г. Иосифьяна» (АО «Корпорация «ВНИИЭМ»).

Отзыв положительный. Имеются замечания:

1. Из результатов работы не совсем понятно: каким образом будет поддерживаться достигнутая в результате маневра фазирования конфигурация созвездия. В численном моделировании предполагается, что большая часть рабочего тела будет израсходована на оперативное построение созвездия, но возмущения от остаточной атмосферы и прочих факторов постепенно будут разрушать конфигурацию созвездия.

2. В параметрах моделирования для маховиков указаны момент инерции, максимальная угловая скорость и максимальное угловое ускорение. Желательно также указывать максимальный момент импульса и максимальный механический момент, который хотя и вычисляются через вышеприведённые параметры, но позволяют быстрее сравнивать предложенные маховики с существующими изделиями.

3. В планах по дальнейшему развитию в качестве одного из вариантов компенсации возмущающего момента предлагается рассмотреть управление временем включения 4-х двигателей. Такой вариант потребует анализа переходных процессов при включении и отключении двигателя. Возможной альтернативой может быть управление не по ШИМ через многократное высокочастотное включение и отключение двигателей, а управление расходом

через изменение площади сечения трубопровода, хотя стоит отметить, что эти вопросы выходят за пределы основной области исследования диссертанта.

4. В планах по дальнейшему развитию работы рассматриваются варианты управления направления вектором тяги, один из которых — использование системы из 4-х сопел, оси которых параллельны, расположены на равном удалении от центра масс и взаимно компенсируют возмущающий механический момент. Другой рассматриваемый вариант — отклонение по двум осям единственного сопла. При дальнейшей проработке проекта имеет смысл также рассмотреть схему из 4-х сопел, оси которых не параллельны, а сходятся в точке, близкой к центру масс, чтобы при значительной разнице по времени включения двигателей минимизировать возмущающий момент.

Указанные недостатки не влияют на общую положительную оценку работы, научную и практическую значимость диссертационной работы З.С. Жумаева. В целом приведённые выше замечания носят рекомендательный характер, так как они отражают пожелания оппонента, которые автор может учесть в дальнейших исследованиях и при проектировании в будущем перспективных маневрирующих малых КА.

Отзыв на диссертацию официального оппонента Абдурахимова Алексея Александровича – доктора технических наук, профессора, начальника кафедры космических аппаратов и средств межорбитальной транспортировки федерального государственного бюджетного военного образовательного учреждения высшего образования «Военно-космическая академия имени А.Ф. Можайского» Министерства обороны Российской Федерации.

Отзыв положительный. Имеются замечания:

1. Предложенный автором научно-методический аппарат обладает большими возможностями по анализу результатов принятых технических решений, однако вынесенная на защиту методика выбора проектных параметров наноспутника с СЭДУ лишена постановок оптимизационных задач и не содержит методов их решения для поиска наилучших значений проектных параметров.

2. При разработке имитационной модели функционирования КА с СЭДУ хорошо обоснованы допущения и подобраны соответствующие модели отдельных элементов аппарата за исключением модели системы электропитания, в которой не учтены процессы регулирования параметров генерирования электроэнергии, влияние которых существенно при частичном затенении солнечных батарей, имеющих относительно крупные фотопреобразователи.

3. Не вполне корректно выполняется верификация модели орбитального движения КА. Модель построена с использованием достаточно грубых

допущений, что, впрочем, вполне соответствует решаемой задаче, но проверяется она по натурным данным, которым модель не должна соответствовать. При этом в модели использованы хорошо апробированные соотношения, и корректнее в данном случае говорить о проверке реализации алгоритмов, заложенных в разработанный программный комплекс.

4. При изложении алгоритма построения орбитальной группировки автор ограничивается задачей фазирования на полный виток двух КА с изменением в общем случае высоты орбиты. При этом за рамками исследования остаётся гораздо более сложная задача равномерного распределения по орбите нескольких аппаратов. Обоснования такой постановки задачи в работе не приведено.

Перечисленные недостатки не снижают общий научный уровень проведённых исследований и в целом не влияют на положительное мнение официального оппонента о представленной диссертационной работе. Диссертационная работа в целом имеет законченный характер, хорошо структурирована, логически связана и достаточно иллюстрирована. Научный язык автора отличается высокой грамотностью, характеризует компетентность автора во всех рассматриваемых областях. Диссертация и автореферат оформлены аккуратно, в полном соответствии с требованиями нормативной документации.

Отзыв на автореферат диссертации федерального государственного учреждения «Федеральный исследовательский центр Институт прикладной математики им. М.В. Келдыша Российской академии наук», подписанный старшим научным сотрудником, кандидатом физико-математических наук Ивановым Д.С.

Отзыв положительный. Имеются замечания:

1. В приведённой в автореферате математической модели движения наноспутника не представлено в явном виде влияние эксцентриситета тяги на угловое движение аппарата.

2. Не все обозначения в уравнениях (4) и (5) описаны в тексте, обозначения угловых скоростей маховиков не соответствуют обозначениям в векторе состояния (2).

3. Имитационная модель кубсата в Scilab слабопонятна, добавление подписей функционального значения каждого блока улучшила бы восприятие блок-схемы.

4. Из текста автореферата не понятно, какова цель верификации модели СОС на результатах наземного эксперимента с наноспутником на аэродинамическом подвесе. В лабораторных условиях на аппарат действует момент силы гравитации вследствие несовпадения точки подвеса с центром

масс, этого момента нет в условиях орбитального полёта. Поэтому представляется разумным верифицировать модель СОС на результатах лётных экспериментов, доступных в литературе.

5. В автореферате есть ряд опечаток, неточных формулировок и пунктуационных ошибок, не влияющих на понимание текста.

Отзыв на автореферат диссертации общества с ограниченной ответственностью «Спутниковые инновационные космические системы» (ООО «СПУТНИКС»), подписанный руководителем проекта НТИ, кандидатом физико-математических наук Карпенко С.О.

Отзыв положительный. Имеются замечания:

1. В главе 3 работы не приведены данные о погрешностях измерения датчиков и исполнительных моментов при проведении эксперимента на аэродинамическом подвесе по верификации результатов численного моделирования, что делает ценность экспериментальной отработки ограниченной.

2. Там же, а также в выводах, не хватает результатов для сравнения эффективного времени работы бортовых систем КА (или иного интегрального показателя эффективности КА), оснащённого СЭДУ, с аппаратом, оснащённым другим типом ДУ, например, ЭРД - при прочих равных условиях. Такое сравнение дало бы возможность чётко подчеркнуть преимущество предлагаемой в диссертации технологии.

3. В подписи к рисунку 1.11 пропущена цифра для позиции 4.

4. Иногда используется узкоспециальный технический жаргон, например, термин «баг» вместо «ошибка в программе» на странице 64.

5. В тексте диссертации допущен ряд опечаток и несогласованных окончаний.

Отзыв на автореферат диссертации федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет)», подписанный доцентом кафедры теоретической механики МФТИ, кандидатом физико-математических наук Притыкиным Д.А.

Отзыв положительный. Имеются замечания:

1. Местами автор допускает небрежные формулировки, так, из фразы «вектор состояния спутника состоит из 20 компонент, 19 из которых независимые, т.к. скалярная часть кватерниона используется для проверки ошибки численного интегрирования из условия нормированности кватерниона» (стр. 13-14) можно было бы понять, что если скалярную часть кватерниона не

использовать для проверки, то независимых компонент в векторе состояния станет 20.

2. Довольно схематично в автореферате описана и модель движения КА, являющаяся одним из результатов, выносимых на защиту (в уравнениях модели раскрыты не все обозначения, не указано, какие именно силы и моменты включены в правую часть уравнений динамики, и какие именно «коэффициенты управления» (стр. 14) определены для каждого режима КА).

3. Видимо только из-за нехватки места в формате автореферата, автор недостаточно подробно раскрывает методики верификации моделей, что вызывает вопросы об их корректности.

Отзыв на автореферат диссертации акционерного общества «Газпром космические системы», подписанный секретарём научно-технического совета, кандидатом технических наук Лазутиным В.А.

Отзыв положительный. В качестве замечаний по автореферату отмечено, что в работе не нашёл отражения вопрос об оптимизации типа рабочего тела, используемого в СЭДУ.

Отзыв на автореферат диссертации акционерного общества «Военно-промышленная корпорация «Научно-производственное объединение машиностроения» (АО «ВПК «НПО машиностроения») корпорации «Тактическое ракетное вооружение», подписанный заместителем начальника ЦБКМ АО «ВПК «НПО машиностроения», кандидатом технических наук Новиковым А.Е. и ведущим научным сотрудником АО «ВПК «НПО машиностроения», кандидатом физико-математических наук Ивановым М.Ю.

Отзыв положительный. Имеются замечания. Из автореферата не ясно:

1. Чем объясняется необходимость использования нескольких специализированных программных пакетов компьютерной математики (к сожалению, без указания их преимуществ и недостатков как инструментария моделирования), поскольку в общем случае было бы достаточным воспользоваться одним из доступных высокоуровневых языков программирования для алгоритмизации предложенных в работе математических моделей;

2. Как учитывается при моделировании функционирования наноспутника деградация солнечных батарей.

Отзыв на автореферат диссертации акционерного общества «Государственный космический научно-производственный центр имени М.В. Хруничева» (АО «ГКНПЦ им. М.В. Хруничева»), подписанный начальником отдела Положенцевым А.Е., ведущим конструктором Михеевым О.В. и утвержденный первым заместителем

генерального конструктора КБ «Салют» АО «ГКНПЦ им. М.В. Хруничева», доктором технических наук, профессором Владимиром А.В.

Отзыв положительный. Имеются замечания:

1. При проведении сравнительного анализа различных ДУ не учитываются их стоимостные показатели, которые, на наш взгляд, имеют важное значение при выборе фазирующих ДУ для рассматриваемого класса микро-КА;

2. В работе отсутствуют обобщённые сведения по техническим, а также массовым характеристикам бортовых систем предлагаемого наноспутника с СЭДУ и его ресурсу, что не позволяет в должной мере оценить степень его технического и конструктивного совершенства;

3. В автореферате не чётко сформулированы различие и взаимосвязь основных участков полёта и режимов работы наноспутника на этих участках, что в определённой степени затрудняет понимание формализма последовательности решаемой задачи.

Отзыв на автореферат диссертации акционерного общества «Корпорация «Московский институт теплотехники» (АО «Корпорация «МИТ»)), подписанный заместителем генерального конструктора АО «Корпорация «МИТ», кандидатом технических наук Смазновым А.Н. и заместителем начальника отделения АО «Корпорация «МИТ», доктором технических наук Горбуновым Н.Н.

Отзыв положительный. В качестве недостатков отмечены недостаточное отражение в автореферате технических решений по масштабируемости элементов солнечной энергодвигательной установки для её применения в составе КА больших и меньших размеров, а также предложений по возможности разгрузки двигателей маховиков за счёт работы двигательной установки, что может дополнительно снизить совокупные габаритно-массовые характеристики служебных систем КА.

Отзыв на автореферат диссертации публичного акционерного общества «Ракетно-космическая корпорация «Энергия» имени С.П. Королёва» (ПАО «РКК «Энергия»)), подписанный старшим научным сотрудником ПАО «РКК «Энергия», кандидатом технических наук Жуковым Н.В.

Отзыв положительный. В качестве замечания (которое может рассматриваться как пожелание автору по выбору дальнейших направлений исследований) отмечено, что не приведены сведения по конкретным образцам ДУ другого типа для малых спутников, с целью сравнения эффективности с предложенным типом СЭДУ.

Отзыв на автореферат диссертации факультета космических исследований федерального государственного бюджетного

образовательного учреждения высшего образования «Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова» (ФКИ МГУ), подписанный ассистентом кафедры управления космическими полётами, кандидатом технических наук Ахмедовым М.Р. и утверждённый деканом факультета космических исследований МГУ имени М.В. Ломоносова, кандидатом физико-математических наук Сазоновым В.В.

Отзыв положительный. Имеются замечания:

1. Требуется уточнить модель системы электропитания. В представленном виде модель учитывает светотеневую обстановку на солнечных батареях чисто геометрически, в то время как из-за электрического взаимодействия элементов и непостоянства температуры неравномерность освещения вызовет сложные нелинейные эффекты. Необходимо учесть оптические явления при пологом освещении батарей. Исследования по этим темам имеются, возможная в перспективе доработка модели не представляет принципиальных трудностей.

2. Недостаточно обосновано предложение автора именовать двигательную установку энергодвигательной. Фактически, в работе рассмотрена тепловая двигательная установка. По замыслу автора солнечный концентратор в некоторых вариантах ориентации спутника должен фокусировать лучи на фотоэлементе солнечных батарей и этим увеличивать их мощность. Однако из-за упомянутых выше нелинейных эффектов мощность батареи в целом, скорее, уменьшится. Кроме того, станет интенсивнее деградация фотоэлементов, а возможно, произойдёт их выход из строя.

Отзыв на автореферат диссертации федерального государственного бюджетного учреждения «4-й Центральный научно-исследовательский институт» Министерства обороны Российской Федерации, подписанный начальником 2-го управления, кандидатом технических наук, старшим научным сотрудником Пышным О.П., начальником отдела Мустюковым П.Е., старшим научным сотрудником, кандидатом технических наук Артюховым Ю.А., научным сотрудником Масленниковой Н.П. и утверждённый заместителем начальника 4 Центрального научно-исследовательского института Министерства обороны Российской Федерации по научной работе Шкарбань В.В.

Отзыв положительный. Имеются замечания:

1. Из описания функционирования наноспутника с СЭДУ не ясно, как связаны между собой задачи обеспечения ориентации наноспутника на Солнце (для эффективной работы гелиоконцентратора) и ориентации на Землю (для выполнения целевой задачи дистанционного зондирования Земли).

2. При разработке компоновочной схемы разгонного блока не сформулированы критерии предпочтения использования одной большой линзы или набора нескольких малых линз и оптическим волокном для сбора излучения.

Выбор официальных оппонентов обосновывается их многолетним опытом, профессионализмом и компетентностью в отрасли науки, к которой относится диссертационная работа Жумаева Зайнуллы Сериковича и подтверждается их научными публикациями в данной отрасли.

Геча Владимир Яковлевич имеет учёную степень доктора технических наук по специальности 05.09.01 – Электромеханика и электрические аппараты. За предыдущие 5 лет имеет не менее 9-ти научных публикаций, входящих в перечень рецензируемых научных изданий. Тематика публикаций связана с направлением исследований диссертации.

Абдурахимов Алексей Александрович имеет учёную степень доктора технических наук по специальности 20.02.14 – Вооружение и военная техника. Комплексы и системы военного назначения. За предыдущие 5 лет имеет не менее 6-ти научных публикаций, входящих в перечень рецензируемых научных изданий. Тематика публикаций связана с направлением исследований диссертации.

Вышеизложенное позволяет считать, что выбор официальных оппонентов является обоснованным, соответствует Постановлению Правительства РФ о порядке присуждения учёных степеней № 842 от 24 сентября 2013 г. и Положению о совете по защите диссертаций на соискание учёной степени кандидата наук, на соискание учёной степени доктора наук, утверждённому приказом Министерства образования и науки РФ № 1093 от 10 ноября 2017 г.

Выбор ведущей организации обоснован тем, что акционерное общество «Центральный научно-исследовательский институт машиностроения» (АО «ЦНИИмаш») – головное предприятие Государственной корпорации по космической деятельности «Роскосмос». ЦНИИмаш занимает ведущее положение в космической инфраструктуре России. Это позволяет специалистам предприятия оценить актуальность, научную новизну и практическую ценность результатов исследования, также сформировать рекомендации по практическому использованию этих результатов для предприятий отрасли, занимающихся проектированием малых космических аппаратов. Список основных публикаций сотрудников ведущей организации по тематике диссертации за последние 5 лет:

1. Ключников В. Ю. Повышение целевой эффективности наноспутников информационного обеспечения // Известия высших учебных заведений. Приборостроение. – 2018. – Т. 61. – №. 5.

2. Великоиваненко В. И., Жиганов В. Н. Методика многокритериального выбора перспективного варианта проекта ракетно-космической техники //Космонавтика и ракетостроение. – 2017. – №. 2. – С. 5-12.

3. Динеев В. Г. и др. Методология исследования динамики системы управления, основанная на разложении передаточной функции замкнутой системы в ряд Лорана //Космонавтика и ракетостроение. – 2020. – №. 1. – С. 27-40.

4. Балухто А. Н., Ключников В. Ю., Хартов В. В. Интеллектуальная обработка целевой информации на борту космических аппаратов многоспутниковых систем //Космонавтика и ракетостроение. – 2020. – №. 3. – С. 49-63.

5. Балухто А. Н. и др. Технологии искусственного интеллекта в управлении многоспутниковыми группировками //Космонавтика и ракетостроение. – 2020. – №. 3. – С. 64-73.

6. Балухто А. Н., Твердохлебова Е. М. Аналитический обзор текущего состояния и перспектив развития в области технологий и программных средств имитационного моделирования космических систем // Космонавтика и ракетостроение. – 2019. – №. 2. – С. 118-133.

7. Титов А. М. Определение параметров кватерниона ориентации космического аппарата при фиксированном объёме измерений и последовательной оценке //Космонавтика и ракетостроение. – 2018. – №. 3. – С. 5-21.

8. Карелин А. В. и др. Методика формирования состава бортовой научной аппаратуры малых космических аппаратов для мониторинга радиоактивного загрязнения Земли //Труды МАИ. – 2018. – №. 103. – С. 22-22.

9. Ключников В. Ю., Романов А. А., Концептуальное проектирование космических систем на основе LEAN-принципов // Ракетно-космическое приборостроение и информационные системы. – 2019. – Т. 6. № 3. – С. 42–56.

Диссертационный совет отмечает, что в результате выполненных соискателем исследований:

доказана актуальность темы исследования по разработке комплексной методики проектирования маневрирующего наноспутника форм-фактора кубсата с солнечной энергодвигательной установкой;

проведён анализ применимости различных ДУ для построения созвездий кубсатов, а также рациональности перехода компоновочной схемы кубсата от 3U к 6U для увеличения общей производительности спутниковой группировки при тех же параметрах ПН;

разработана упрощённая пневмогидросхема СЭДУ, пригодная для использования на наноспутниках (спутники массой от 1 до 10 кг);

разработана методика, позволяющая на основе связной математической модели функционирования подсистем наноспутника, включая такие системы как СЭДУ, систему ориентации и стабилизации, систему электропитания и баллистику орбитального движения выбрать рациональную компоновку и проектные параметры спутника на начальных этапах проектирования;

разработаны программно-вычислительные комплексы для проведения требуемых проектных расчётов;

предложено и обосновано оригинальное решение – использовать наноспутник класса кубсат форм-фактора 6U с СЭДУ на борту для построения орбитальной группировки спутников дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ);

установлены возможность достижения глобального покрытия и снижение сроков развёртывания орбитальной группировки за счёт использования СЭДУ при той же суммарной стартовой массе и объёме спутников группировки;

новые понятия не вводились.

Теоретическая значимость исследования обосновывается тем, что разработана методика научно обоснованного выбора проектных параметров, основанная на математической модели функционирования наноспутника с СЭДУ новой схемы, состоящая из системы уравнений, описывающих взаимосвязанное функционирование подсистем: солнечной энергодвигательной установки, систем электропитания, ориентации и стабилизации, системы управления движением. Разработан алгоритм управления движением наноспутника с СЭДУ для фазирования группировки спутников, не допускающий значительного увеличения эллиптичности орбиты в ходе маневрирования. С помощью предложенной методики определены проектные параметры маневрирующего наноспутника с СЭДУ, построенного по новой компоновочной схеме в формате кубсат 6U.

Значение полученных соискателем результатов исследования для практики подтверждается тем, что разработанная методика носит универсальный характер и может быть применена при проектировании маневрирующих КА с СЭДУ не только наноспутников формата кубсат, но аппаратов классов пико-, микро- и мини.

Разработанные автором методика и программный комплекс были использованы при проектировании сверхмалого разгонного блока в рамках конкурса концепций сверхлёгких средств выведения, организованного АНО «Аналитический центр «Аэронет» в рамках договора №2110.10.2020-В от 15.10.2020 г., что подтверждается соответствующим актом.

В рамках диссертационной работы создан реализующий разработанную методику программный комплекс, который используется в учебном процессе на

кафедре «Аэрокосмические системы» МГТУ им. Н.Э. Баумана, что подтверждается соответствующим актом.

Оценка достоверности результатов исследования выявила следующее:

– **достоверность** обусловлена строгостью используемого математического аппарата и подтверждаются результатами вычислительных экспериментов. Результаты диссертационной работы согласуются с известными результатами других авторов и результатами экспериментов;

– основные положения и результаты **опубликованы** в рецензируемых научных журналах и **доложены** на всероссийских и международных конференциях, симпозиумах и семинарах: 54-х и 56-х Научных чтениях памяти К.Э. Циолковского (г. Калуга 2019, 2021); XL и XLV Академических чтениях по космонавтике, посвящённых памяти академика С.П. Королёва и других выдающихся отечественных учёных-пионеров освоения космического пространства (г. Москва 2016, 2021); VII Всероссийской конференции «Необратимые процессы в природе и технике» (г. Москва, 2013); Всероссийских конференциях молодых учёных и специалистов «Будущее машиностроения России» (г. Москва 2011, 2012).

Личный вклад соискателя состоит в том, что лично автором: разработана адаптированная пневмогидросхема СЭДУ для использования на борту наноспутника; разработана комплексная методика проектирования и связанная математическая модель маневрирующего наноспутника форм-фактора кубсат, позволяющая проводить оперативный проектно-конструкторский анализ для осуществления выбора наиболее рациональной компоновки КА и его проектных параметров; разработаны программно-вычислительные комплексы для проведения требуемых проектных расчётов; подготовлено значительное число публикаций по проведённому исследованию. Из совместных публикаций в диссертацию включён лишь тот материал, который непосредственно принадлежит соискателю, заимствованный материал обозначен в работе ссылками.

В ходе защиты диссертации были высказаны следующие замечания и вопросы:

1. Из результатов работы не совсем понятно: каким образом будет поддерживаться достигнутая в результате маневра фазирования конфигурация созвездия. В численном моделировании предполагается, что большая часть рабочего тела будет израсходована на оперативное построение созвездия, но возмущения от остаточной атмосферы и прочих факторов постепенно будут разрушать конфигурацию созвездия.

2. Предложенный автором научно-методический аппарат обладает большими возможностями по анализу результатов принятых технических

решений, однако вынесенная на защиту методика выбора проектных параметров наноспутника с СЭДУ лишена постановок оптимизационных задач и не содержит методов их решения для поиска наилучших значений проектных параметров.

3. Из текста автореферата не понятно, какова цель верификации модели СОС на результатах наземного эксперимента с наноспутником на аэродинамическом подвесе. В лабораторных условиях на аппарат действует момент силы гравитации вследствие несовпадения точки подвеса с центром масс, этого момента нет в условиях орбитального полёта. Поэтому представляется разумным верифицировать модель СОС на результатах лётных экспериментов, доступных в литературе.

4. Как учитывается при моделировании функционирования наноспутника деградация солнечных батарей?

5. В автореферате недостаточно отражены технические решения по масштабируемости элементов солнечной энергодвигательной установки для её применения в составе КА больших и меньших размеров.

6. Недостаточно обосновано предложение автора именовать двигательную установку энергодвигательной. Фактически, в работе рассмотрена тепловая двигательная установка. По замыслу автора солнечный концентратор в некоторых вариантах ориентации спутника должен фокусировать лучи на фотоэлементе солнечных батарей и этим увеличивать их мощность. Однако из-за упомянутых выше нелинейных эффектов мощность батареи в целом, скорее, уменьшится. Кроме того, станет интенсивнее деградация фотоэлементов, а возможно, произойдёт их выход из строя.

7. Как Вы решаете проблему космического мусора?

8. В названии диссертации указана «Методика проектирования», а в положениях, выносимых на защиту, указана только часть методики. Может быть название диссертации необходимо скорректировать и сделать более узким?

9. Существует ли опытный образец двигательной установки?

10. Какие погрешности эксперимента, где показаны стандартные отклонения?

11. В автореферате представлены ссылки только на работы иностранных учёных, знакомы ли Вы с работами отечественных учёных по двигательным установкам?

Соискатель Жумаев Зайнулла Серикович ответил на высказанные замечания и вопросы и привёл собственную аргументацию:

1. Для поддержания конфигурации созвездия необходимо знать требования к точности распределения спутников по орбите. Исходя из требований точности

возможно либо увеличение запаса рабочего тела в СЭДУ для периодической коррекции орбиты, либо применение миниатюрных ЭРД в комбинации с СЭДУ. Тяга ЭРД недостаточна для быстрого построения созвездия, но миниатюрность и точность управления тягой позволяют использовать их в комбинации с СЭДУ. В случае использования только СЭДУ для периодической коррекции орбиты, дополнительного исследования требует точность управления продолжительностью одного включения двигателя.

2. В цели работы, действительно, не входило решение оптимизационных задач. Для того чтобы решать задачи оптимизации необходимо сначала построить связную математическую модель наноспутника с СЭДУ, которая была разработана впервые. В целом решение оптимизационных задач в некоторой степени затруднено на кубсатах. При проектировании кубсата существенными ограничениями являются требования стандарта и наличие подсистем с летной квалификацией. Пространство поиска возможных решений часто оказывается дискретным, а отдельные подсистемы с летной квалификацией не являются оптимальными для каждой отдельной задачи. При наличии финансирования на десятки аппаратов, выполняющих одну задачу, и возможности проведения экспериментальных запусков первых поколений спутников можно отказаться от модульной компоновки аппарата и проводить оптимизацию спутника для решения отдельной задачи.

3. Момент силы гравитации безусловно оказывает влияние на динамику спутника на наземном стенде. Но, во-первых, этот момент обычно минимизируют за счёт системы противовесов и оставшийся некомпенсированный момент на несколько порядков меньше механического момента, создаваемого маховиками. В математической модели есть возможность учесть оставшийся некомпенсированный момент от гравитационных сил. Во-вторых, перед запуском спутника всё равно необходимо проводить наземную отработку системы ориентации и стабилизации на стенде. Ценность верификации модели СОС на наземном стенде заключается, например, в исключении фатальных ошибок. На практике известен случай, когда из-за ошибки в знаке в программном обеспечении был потерян спутник. В дальнейшей работе планируется уточнить модели исполнительных органов и добавить шум в показания датчиков.

4. Этап маневрирования занимает меньше недели, деградация солнечных батарей за это время несущественная. При моделировании дальнейшей работы возможно использование параметров на конец срока активного существования.

5. Для аппаратов среднего класса возможно частичное усложнение конструкции для увеличения эффективности. Например, возможно использование накопителя давления и регулирующего клапана для поддержания

постоянного давления на входе в сопло. Подобное усложнение конструкции для аппарата среднего класса не столь критично, как для наноспутника, но может существенно увеличить эффективность работы СЭДУ. При этом описанные в литературе наиболее эффективные и при этом наиболее сложные конструкции применимы в первую очередь для больших аппаратов.

6. В первую очередь СЭДУ в работе рассматривается как двигательная установка, а возможность генерации электроэнергии рассматривается как вспомогательная функция, которая повысит общее совершенство спутника. При использовании концентратора для выработки дополнительной энергии на фотоэлементах возможно варьирование расстояния между концентратором и фотопреобразователем, т. е. степени концентрации дополнительного светового потока, и угла падения сфокусированного потока. Необходимо исследовать при каком увеличении падающей мощности и соответствующей деградации батарей, учитывая короткий срок существования спутника и дороговизну GaAs фотопреобразователей, такое техническое решение будет оправдано.

7. Во-первых, из-за большего отношения площади к объёму у малых аппаратов, они быстрее сходят с орбиты, т. к. площадь растёт пропорционально квадрату размера аппарата, а объём пропорционально кубу. Наноспутники обычно запускают на низкие околоземные орбиты, где ещё существенно влияние атмосферы, они сходят с орбиты за несколько лет. И во-вторых, если мы посмотрим на количество объектов космического мусора на орбите, то это десятки тысяч, при том что таких малых аппаратов меньше тысячи. А основные всплески засорения, на самом деле, были, в первый раз, когда столкнулись российский и американский спутники: тогда количество объектов космического мусора увеличилось на несколько тысяч. И, во второй раз, когда Китай сбил свой спутник. Количество объектов космического мусора подобного размера на несколько порядков превосходит количество наноспутников.

8. Безусловно, методика проектирования – это комплексное понятие. Но название соответствует диссертации. Более полное изложение методики представлено в полном тексте диссертации, а в автореферате, в целях и положениях, выносимых на защиту, необходимо было выбрать ключевые моменты, которые необходимо было подсветить.

9. Опытный образец двигательной установки не создавался. Но принципиальных трудностей по созданию такой двигательной установки нет. Конструктивно СЭДУ близка к электротермической двигательной установке, которая была испытана в космосе. А линза Френеля, хотя и для других целей, но также была испытана в космосе.

10. В эксперименте по верификации ДУ проверялось стационарное истечение.

11. В автореферате представлены ссылки только на несколько иностранных работ в части обоснования актуальности работы. В тексте диссертации представлены также ссылки на работы отечественных учёных, и не только в общем по двигательным установкам, но и в частности по СЭДУ. Например, указаны ссылки на работы Грилихеса, Кудрина. В частности, некоторые из этих учёных – представители МАИ.

Соискатель указал, что все высказанные замечания будут учтены в ходе проведения дальнейших исследований.

На заседании 26 апреля 2022 года диссертационный совет **принял решение:** за решение актуальной и практически значимой научно-технической задачи по разработке комплексной методики проектирования маневрирующего наноспутника с солнечной энергодвигательной установкой, позволяющей построить произвольную конфигурацию созвездия в пределах исходной орбиты за время не превышающее шесть суток, имеющей существенное значение для развития отечественной ракетно-космической отрасли, присудить Жумаеву Зайнулле Сериковичу учёную степень кандидата технических наук.

При проведении тайного голосования диссертационный совет в количестве 16 человек, из них 5 докторов наук по специальности 05.07.02 «Проектирование, конструкция и производство летательных аппаратов», участвовавших в заседании, из 23 человек, входящих в состав совета, дополнительно введены на разовую защиту 0 человек, проголосовали: за – 16, против – 0, недействительных бюллетеней – 0.

Председатель

диссертационного совета

Денискин Юрий Иванович

Учёный секретарь

диссертационного совета

Денискина Антонина Робертовна

26 апреля 2022 года

Начальник диссертационного совета МАИ

Т.А. А...

