

На правах рукописи



Метельников Артём Александрович

**Космическая лазерная энергетическая установка на основе волоконных
лазеров**

Специальность 05.07.05
«Тепловые, электроракетные двигатели и энергоустановки
летательных аппаратов»

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Москва – 2019

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)».

Научный руководитель: кандидат технических наук, доцент
Авдеев Алексей Валерьевич

Официальные оппоненты: **Ребров Сергей Григорьевич**
доктор технических наук, Государственный научный центр РФ – федеральное государственное унитарное предприятие «Исследовательский центр им. М.В.Келдыша», начальник отдела

Кулалаев Виктор Валентинович
кандидат технических наук, доцент, «Опытно-конструкторское бюро имени А.Люльки» – филиал ПАО «ОДК-УМПО», главный специалист отдела перспективных разработок

Ведущая организация: федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Балтийский государственный технический университет «ВОЕНМЕХ» им. Д.Ф. Устинова»

Защита состоится «30» декабря 2019 года в 12 ч. 00 мин. на заседании диссертационного совета Д 212.125.08, созданного на базе ФГБОУ ВО «Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)», по адресу: 125993, г. Москва, А-80, ГСП-3, Волоколамское шоссе, д.4.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте ФГБОУ ВО «Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)» <https://mai.ru/upload/iblock/763/2.-Dissertatsiya-Metelnikov.pdf>

Автореферат разослан « ____ » _____ 2019 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета Д 212.125.08,
д.т.н., профессор

Зуев Юрий Владимирович

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования и степень ее разработанности

Очистка околоземного пространства от опасных фрагментов космического мусора (ФКМ) является актуальной задачей. В диссертации под очисткой околоземного пространства понимается такое воздействие на опасный ФКМ, после которого перигей его орбиты уменьшается на заданную величину. В результате чего, плотность потока опасных ФКМ на выбранной орбите становится меньше.

С точки зрения очистки околоземного пространства, наилучшим вариантом является перевод опасных ФКМ на такие орбиты, двигаясь по которым ФКМ начинает проходить через плотные слои атмосферы и сгорает. В диссертации принято, что таким орбитам соответствуют орбиты с высотой от поверхности Земли в перигее равной ≈ 100 км, а минимальная величина снижения перигея орбиты опасного ФКМ, требуемая для очистки выбранной орбиты, составляет $\Delta h_{\text{ФКМ}}=100$ км. Под опасными ФКМ в диссертации понимается ФКМ с наибольшим поперечным размером от 1 см до 10 см.

Выделяются два типа орбит, которые могут быть подвергнуты очистке от опасных ФКМ: 1) орбиты с наибольшей плотностью потока опасных ФКМ; 2) орбиты, которые активно используются для базирования космических аппаратов (КА) различного назначения.

К первому типу орбит можно отнести орбиты с высотами от 800 км до 1600 км. При этом, согласно ГОСТ Р 25645.167-2005, наибольшая плотность потока опасных ФКМ соответствует орбитам с высотами 800 км ... 1200 км. Ко второму типу орбит можно отнести орбиты с высотами 400 км ... 600 км.

Для изменения орбиты ФКМ в диссертации предлагается использовать лазерно-реактивный метод воздействия. Суть лазерно-реактивного метода заключается в испарении части материала ФКМ при воздействии на него лазерным излучением, в результате чего на его поверхности возникает реактивный факел. Появление реактивного факела приводит к возникновению импульса отдачи, изменяющего как скорость ФКМ, так и перигей его орбиты.

Установки космического базирования, которые позволяют воздействовать на опасные ФКМ по лазерно-реактивному методу, в диссертации называются

космическими лазерными энергетическими установками (КЛЭУ). Традиционно, в составе КЛЭУ рассматривается использование твердотельных лазеров на основе кристаллов и химических лазеров. Однако развитие современной техники позволяет использовать для решения очистки околоземного пространства от ФКМ и волоконные лазеры, которые обладают рядом преимуществ по сравнению с твердотельными и химическими лазерами. Так, соотношение площади поперечного сечения и длины активной среды в волоконных лазерах позволяет более эффективно, по сравнению с твердотельными лазерами на основе кристаллов, решать вопрос отвода тепла.

Кроме этого, по сравнению с КЛЭУ на основе непрерывных химических лазеров (НХЛ), КЛЭУ на основе волоконных лазеров имеет меньшую массу. Например, масса КЛЭУ на основе HF/DF непрерывного химического лазера (НХЛ) с мощностью излучения 5 кВт при работе в непрерывном режиме, приведенная в описании соответствующего проекта, составляет 13,7 т. Из них 6,7 т – масса системы хранения запасов компонентов рабочего тела, которая обеспечивает 280 мин непрерывной работы НХЛ. В то время, как масса КЛЭУ с волоконным лазером *ICAN* и режимом работы эквивалентным мощности лазерного излучения в непрерывном режиме 1 кВт оценивается в 2,4 т. Время работы КЛЭУ ограничено ресурсом системы электропитания и возможностью системы обеспечения температурного режима КЛЭУ.

Еще одним преимуществом волоконных лазеров является их высокий КПД. Так, например, КПД лазерной системы проекта КЛЭУ с лазером *ICAN* составляет 30%, что превосходит КПД НХЛ (до 15%) и твердотельных лазеров на основе кристаллов (3%-4%).

Учитывая вышеизложенное, волоконные лазеры рассматриваются для решения задачи очистки околоземного пространства от ФКМ. Например, в проекте КЛЭУ с волоконным лазером *ICAN* обеспечиваются энергетические и временные характеристики лазерного излучения, эквивалентные мощности лазерного излучения в непрерывном режиме 100 кВт.

Для очистки околоземного пространства КЛЭУ на основе волоконных лазеров и КА, обеспечивающему работу КЛЭУ, необходимо решить задачи: генерации электрической энергии; преобразования полученной энергии в лазерное излучение;

коррекции орбиты КА с КЛЭУ и т.д. В современной научно-технической литературе, посвященной разработке КА с КЛЭУ для очистки околоземного пространства от опасных ФКМ, вышеперечисленные задачи рассматриваются фрагментарно без взаимоувязки, а задача коррекции орбиты КА зачастую и вовсе не упоминается. Так как подобный подход не позволяет учесть все ограничения на параметры КЛЭУ, то становится проблематичным определение эффективности ее применения для решения задачи очистки выбранной орбиты от опасных ФКМ, а, следовательно, и целесообразности ее создания.

Объектом исследования являются КЛЭУ на основе волоконных лазеров и подсистемы КА, обеспечивающие работу КЛЭУ.

Целью работы является формирование структурного облика и параметрический синтез КЛЭУ на основе волоконных лазеров, решающей задачу очистки выбранной орбиты от опасных ФКМ.

Задачи диссертации. Для достижения поставленной цели для КЛЭУ на основе волоконных лазеров, решающей задачу очистки выбранной орбиты от опасных ФКМ, необходимо решить следующие задачи:

1. Определить структуру и режимы работы КЛЭУ.
2. Разработать методики, позволяющие оценить:
 - 2.1. Эффективность применения КЛЭУ.
 - 2.2. Массу КА с КЛЭУ.
3. Определить исходные данные и ограничения на параметры КЛЭУ.
4. Предложить методику параметрического синтеза КЛЭУ.
5. Провести параметрический синтез КЛЭУ, определить массу КА с КЛЭУ и эффективность применения КЛЭУ.

Положения, выносимые на защиту

1. Разработанные в диссертации методики для КЛЭУ на основе волоконных лазеров, решающей задачу очистки околоземного пространства от опасных ФКМ, которые позволяют:
 - 1.1. Определить параметры режимов и эффективность применения КЛЭУ.
 - 1.2. Рассчитать массу КА с КЛЭУ.

- 1.3. Проводить параметрический синтез КЛЭУ.
2. Результаты параметрического синтеза КЛЭУ на основе волоконных лазеров, расчета массы КА с такой КЛЭУ и эффективности применения КЛЭУ на основе волоконных лазеров, предназначенной для очистки выбранной орбиты от опасных ФКМ.

Методология и методы диссертационного исследования

В работе применялись:

1. сравнение – для оценки результатов математического моделирования в отношении существующих проектов КЛЭУ;
2. анализ – для выявления типовых сценариев применения КА с КЛЭУ;
3. абстракция – для упрощения представления о подсистемах КА и КЛЭУ и реализации математических моделей.
4. индукция – при определении исходных данных и ограничений на параметры КЛЭУ.

Научная новизна исследования

Для КЛЭУ на основе волоконных лазеров, решающей задачу очистки выбранной орбиты от опасных ФКМ:

1. Предложена методика определения параметров режимов работы КЛЭУ и эффективности ее применения, учитывающая сценарий воздействия КЛЭУ на ФКМ.
2. Разработана методика определения массы КА с КЛЭУ, учитывающая ограничения на энергомассовые характеристики подсистем КЛЭУ, и подсистем КА, обеспечивающих работу КЛЭУ.
3. Впервые предложена методика параметрического синтеза КЛЭУ, учитывающая ограничения на подсистемы КА, обеспечивающие работу КЛЭУ.

Теоретическая и практическая значимость исследования

Полученные результаты могут быть использованы:

1. При разработке методов оптимального согласования параметров и характеристик системы «силовая установка – летательный аппарат» и анализа ее эффективности.

2. В исследованиях, целью которых является определение характеристик энергетических установок летательных аппаратов, решающих задачу очистки околоземного пространства от ФКМ, при различных условиях их использования.
3. Предприятиями, подведомственными государственной корпорации по космической деятельности «Роскосмос», перед которыми стоит задача защиты КА и очистки околоземного пространства от ФКМ.

Степень достоверности результатов

Достоверность результатов проведенной научной работы обеспечивается использованием:

- известных математических моделей при расчете массы и определении эффективности применения КЛЭУ;
- опубликованных результатов наземных экспериментов при определении оптимальной плотности энергии $J_{\text{опт}}$ и коэффициента связи C_m между значениями создаваемой тяги и мощностью лазерного излучения, которым был облучен материал;
- значений параметров существующих проектов КЛЭУ и подсистем КА при выборе исходных данных и ограничений на параметры КЛЭУ для параметрического синтеза КЛЭУ, определения массы КА с КЛЭУ и эффективности применения КЛЭУ для очистки выбранной орбиты от опасных ФКМ.

Личный вклад соискателя

Для КЛЭУ на основе волоконных лазеров, решающей задачу очистки околоземного пространства от опасных ФКМ:

1. Соискателем предложена методика, позволяющая проводить параметрический синтез КЛЭУ.
2. Определены ограничения на энергомассовые характеристики подсистем КЛЭУ и подсистем КА, обеспечивающих работу такой КЛЭУ.
3. На основе разработанной методики соискателем проведен параметрический синтез КЛЭУ, рассчитана масса КА с такой КЛЭУ и определена эффективность ее применения для очистки орбит с наклоном 55° , высотами 450 км и 850 км от опасных ФКМ.

4. На основании полученных данных соискателем сформулированы рекомендации по выбору типа системы генерации электрической энергии КА в зависимости от высоты базирования и режима работы КЛЭУ.

Сведения об апробации результатов исследования

Основные результаты исследований докладывались на 7-ми международных конференциях: 13-ая международная конференция «Авиация и космонавтика – 2014», Москва, 17-21 ноября 2014 г.; XLII Международная молодежная научная конференция Гагаринские чтения – 2016, Москва, 12-15 апреля 2016; XLIII Международная молодежная научная конференция «Гагаринские чтения – 2017», Москва, 5-19 апреля 2017 г.; 16-ая Международная конференция «Авиация и космонавтика-2017», Москва, 20-24 ноября 2017 г.; XLIV Международная молодежная научная конференция «Гагаринские чтения – 2018», Москва, 17-20 апреля 2018 г.; 17-ая Международная конференция «Авиация и космонавтика-2018», Москва, 19-23 ноября 2018 г.; XLV Международная молодежная научная конференция «Гагаринские чтения – 2019», Москва, 16-19 апреля 2019 г.

Публикации по теме диссертации

По теме диссертации опубликовано 16 научных работ, из них 4 – в рецензируемых научных изданиях. Из 16 работ: 4 – статьи в рецензируемых научных изданиях; 1 – научный труд, опубликованный в издании, приравненном к рецензируемому (Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2018666280 от 13.12.2018 г.), 8 – тезисы докладов на научных конференциях; 2 – аннотации конкурсных работ.

Структура и объем диссертации

Диссертация состоит из введения, 4 глав и заключения. Общий объем диссертации - 112 страниц, работа содержит 34 таблицы, 41 рисунок и список литературы из 62 наименований.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** обоснована актуальность темы диссертации, сформулированы цели работы и приведено краткое содержание глав диссертации.

В **первой главе** проведен обзор литературных источников, посвященных применению КЛЭУ для решения задачи очистки околоземного пространства от опасных ФКМ. Рассмотрены проекты КЛЭУ, использующие лазерно-реактивный метод для очистки заданной орбиты от опасных ФКМ: их основные характеристики и структура.

В конце главы на основании проведенного обзора литературных источников для КЛЭУ на основе волоконных лазеров, решающей задачу очистки выбранной орбиты от опасных ФКМ, определены:

- структура КЛЭУ;
- основные связи между подсистемами КА и КЛЭУ;
- технические решения, использованные в рассмотренных проектах КЛЭУ,

которые необходимо учесть при разработке методик расчета массы КА с КЛЭУ и для определения эффективности применения КЛЭУ.

Основные системы и подсистемы КЛЭУ на основе волоконных лазеров, решающей задачу очистки выбранной орбиты от опасных ФКМ, приведены в таблице 1.

Таблица 1 – Системы и подсистемы, входящие в состав КЛЭУ на основе волоконных лазеров, решающей задачу очистки выбранной орбиты от опасных ФКМ

Система	Подсистема	Задача системы
лазерная (далее ЛС)	генерации лазерной энергии (далее СГ)	генерация лазерного излучения в заданном режиме
	обеспечения теплового режима (СОТР)	обеспечение температурного режима ЛС

Система	Подсистема	Задача системы
формирования лазерного излучения и обнаружения целей (далее ФОС)		создание требуемой плотности энергии лазерного излучения на заданном расстоянии; наведение созданного ЛС излучения на цель в пределах рабочей зоны (зона отклонения передающего телескопа ФОС); получение информации для датчиков обнаружения целей
обнаружения (СО)		определение координат целей по сигналам, получаемых ФОС и/или собственными пассивными средствами обнаружения

Основными подсистемами КА, обеспечивающими работу рассматриваемой в диссертации КЛЭУ, являются: система генерации электрической энергии (СЭП) и система коррекции орбиты (далее система коррекции и маневрирования (СКМ)). Функциональная схема, показывающая основные связи между рассматриваемыми подсистемами КЛЭУ, подсистемами СЭП и СКМ КА, приведена на рисунке 1.

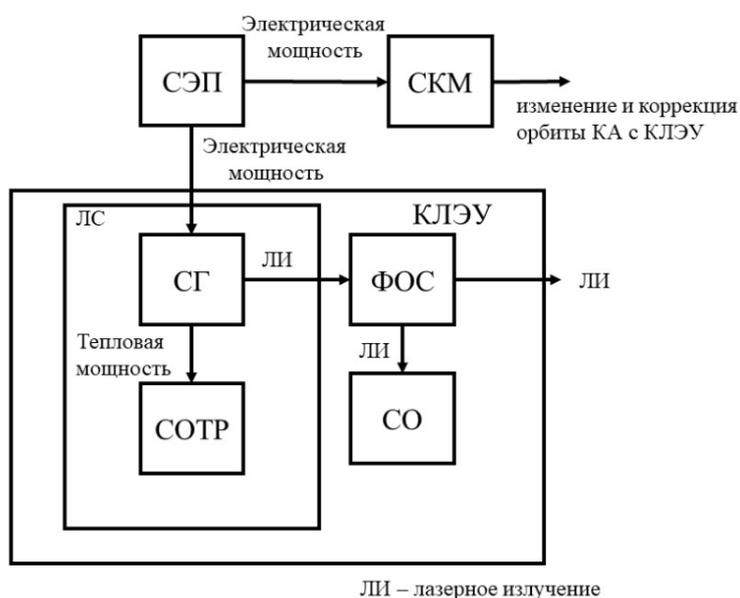


Рисунок 1 - Функциональная схема КА с КЛЭУ

В результате проведенного обзора литературных источников определены режимы работы КЛЭУ на основе волоконных лазеров, решающей задачу очистки выбранной орбиты от опасных ФКМ.

Для очистки заданной орбиты от опасных ФКМ КЛЭУ решаются две задачи:

1. обнаружение опасных ФКМ – работа КЛЭУ в режиме «Обнаружение»;

2. перевод опасных ФКМ на другие орбиту, используя лазерно-реактивный метод - работа КЛЭУ в режиме «Воздействие».

Ниже приведен сценарий работы КЛЭУ в каждом из указанных режимов.

В режиме «Обнаружение» ФОС КЛЭУ последовательно сканирует заданную пространственную зону в поисках опасных ФКМ. Для обнаружения ФКМ с размерами 1...10 см используется метод лазерной локации. Поэтому, для обнаружения таких ФКМ ЛС генерирует лазерные (локационные) импульсы.

На основании полученных СО данных КЛЭУ принимает решение о том, относится ли обнаруженный объект к опасным ФКМ или нет. Для выполнения подобной классификации используются признаки: угловой размер объекта, траектория полета и другие. Если ФКМ был отнесен к классу опасных, то на основании полученных о нем данных принимается решение о целесообразности перевода КЛЭУ в режим «Воздействие». Задача разработки алгоритмов классификации обнаруживаемых КЛЭУ ФКМ и критериев перехода КЛЭУ в режим «Воздействие» не входит в задачи диссертационного исследования. Если ФКМ классифицирован как опасный, и принято решение о переводе КЛЭУ в режим «Воздействие», то оптическая ось ФОС наводится на него с требуемой точностью, а КЛЭУ переводится в режим «Воздействие».

В режиме «Воздействие» ФОС сопровождает обнаруженный опасный ФКМ с требуемой точностью, а ЛС формирует лазерные импульсы, воздействующие на ФКМ по лазерно-реактивному методу. КЛЭУ переводится в режим «Обнаружение» после того как ФКМ покидает пределы рабочей зоны КЛЭУ в режиме «Воздействие».

Вторая глава посвящена разработке методики определения параметров режимов работы и эффективности применения КА с КЛЭУ, решающей задачу очистки околоземного пространства от опасных ФКМ. Возможны два основных сценария воздействия на ФКМ: воздействие на ФКМ, проекция вектора относительной скорости сближения, с которым на направление тангенциальной составляющей вектора скорости КА в геоцентрической системе координат противоположна тангенциальной составляющей вектора скорости КА (ФКМ летит навстречу КА) (сценарий 1), и воздействие на ФКМ, проекция вектора относительной скорости сближения с которым на направление тангенциальной составляющей вектора скорости КА в геоцентрической системе координат сонаправлена с

тангенциальной составляющей вектора скорости КА (ФКМ догоняет КА с КЛЭУ) (сценарий 2). На основании данных, указанных в ГОСТ Р 25645.167-2005, наиболее вероятным сценарием является сценарий 1 (для наклонений орбиты КА, принадлежащих диапазону 55...105° вероятность осуществления сценария 1 составляет $P=0,96-0,99$). Поэтому, разработка методики определения параметров режимов «Обнаружение» и «Воздействие» проводилась именно для первого сценария.

Под выбранной орбитой в данной работе понимается орбита базирования КА с КЛЭУ: круговая орбита с высотой $H_{\text{КЛЭУ}}$ и наклонением $i_{\text{КЛЭУ}}$. Несмотря на то, что ФКМ в основном имеют эллиптические орбиты, в диссертации принимается приближение, что на момент воздействия орбита опасного ФКМ является круговой с радиусом r_1 , соответствующим радиусу круговой орбиты КА с КЛЭУ (высота орбиты ФКМ равна высоте выбранной орбиты $H_{\text{КЛЭУ}} \approx H_{\text{ФКМ}}$). Поэтому, для уменьшения перигея орбиты опасного ФКМ необходимо понизить его скорость $V_{\text{ФКМ}}$ на величину $\Delta V_{\text{ФКМ}}$, что приведет к его переходу на эллиптическую орбиту с высотой в перигее $H_{\text{ФКМ}} - \Delta h_{\text{ФКМ}}$ (см. рисунок 2).

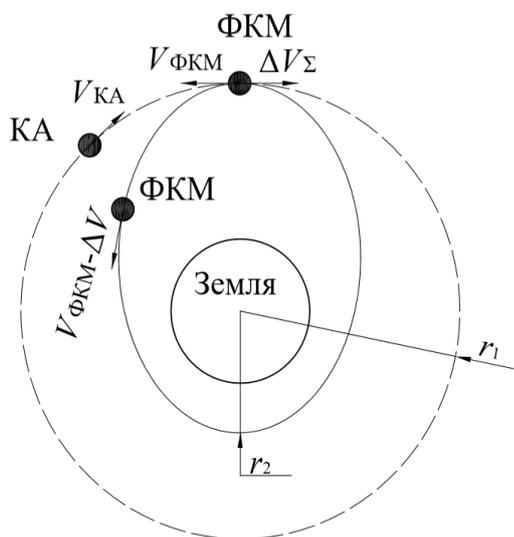


Рисунок 2 – К определению требуемой величины изменения скорости ФКМ

Для расчета величины изменения скорости ФКМ $\Delta V_{\text{ФКМ}}$, эквивалентной эллиптической орбите с высотой в перигее $H_{\text{ФКМ}} - \Delta h_{\text{ФКМ}}$, в диссертации используется следующее соотношение:

$$\Delta V_{\Sigma} = \sqrt{\frac{2 \cdot \mu \cdot r_2}{r_1 \cdot (r_1 + r_2)}} - \sqrt{\frac{\mu}{r_1}}, \quad (1)$$

где $r_1 = H_{\text{ФКМ}} + R_3$;

$r_2 = H_{\text{ФКМ}} - \Delta h_{\text{ФКМ}} + R_3$;

μ – гравитационный параметр Земли ($\mu = 3,986 \cdot 10^5 \text{ км}^3/\text{с}^2$);

R_3 – экваториальный радиус Земли; $R_3 = 6378,14 \text{ [км]}$.

Для определения эффективности работы КЛЭУ в диссертации предлагается использовать отношение:

$$\eta_{\text{очистки}} = N_{\text{ФКМ}}^{\Delta V} / N_{\text{ФКМ}}^{\Sigma}, \quad (2)$$

где $N_{\text{ФКМ}}^{\Delta V}$ - число опасных ФКМ, которые были удалены с выбранной орбиты за один год (высота перигея орбиты которых в результате воздействия уменьшена не менее чем на 100 км) [год⁻¹]; $N_{\text{ФКМ}}^{\Sigma}$ – общее число обнаруженных КЛЭУ опасных ФКМ за один год [год⁻¹].

Параметр $\eta_{\text{очистки}}$ учитывает, как энергетические характеристики КЛЭУ, так и свойства для занимаемой КА с КЛЭУ орбиты условия, при которых на ФКМ осуществляется воздействие: относительную скорость сближения КА с КЛЭУ и ФКМ, возможные углы между траекториями полета КА с КЛЭУ и ФКМ и другие.

Однако $\eta_{\text{очистки}}$ является относительной величиной и не дает понимания о числе опасных ФКМ, которые были удалены с выбранной орбиты. Поэтому, для сравнения различных вариантов КЛЭУ на основе волоконных лазеров в диссертации предлагается использовать параметр $r_{\text{скан}}$ – радиальный размер проекции рабочей зоны КЛЭУ в режиме «Обнаружение» на плоскость, перпендикулярную тангенциальной составляющей вектора скорости КА с КЛЭУ [м].

Для определения требований к энергетическим характеристикам КЛЭУ, предназначенной для очистки выбранной орбиты от опасных ФКМ, в литературе используются параметры: требуемая для возникновения на поверхности ФКМ процесса плазмообразования плотность энергии $J_{\text{опт}}$ [Дж/м²]; коэффициент связи между значениями создаваемой тяги и мощностью лазерного излучения, которым был облучен материал C_m (далее «коэффициент связи») [Н/Вт].

В литературе, посвященной воздействию на ФКМ по лазерно-реактивному методу, предлагаются следующие соотношения для расчета $J_{\text{опт}}$:

$$J_{\text{опт}} = 4,79 \cdot 10^8 \cdot (\tau_{\text{лс}})^{0,5}, \text{ при } \tau_{\text{лс}} \geq 10^{-11} \text{ с}, \quad (3)$$

$$J_{\text{опт}} = 10^4, \text{ при } \tau_{\text{лс}} < 10^{-11} \text{ с}, \quad (4)$$

где $\tau_{\text{лс}}$ – длительность лазерного импульса [с].

Коэффициент связи зависит от длины волны лазерного излучения $\lambda_{\text{лс}}$, плотности энергии на ФКМ $J_{\text{ФКМ}}$ и длительности лазерного импульса $\tau_{\text{лс}}$:

$$C_m = f(x), \quad (5)$$

$$x = \frac{J_{\text{ФКМ}}}{\tau_{\text{лс}}} \cdot \lambda_{\text{лс}} \cdot \sqrt{\tau_{\text{лс}}} \left[\frac{\text{Вт} \cdot \sqrt{\text{с}}}{\text{м}} \right]. \quad (6)$$

В диссертации принято, что $J_{\text{ФКМ}} = J_{\text{опт}}$.

Результаты наземных экспериментов показали, что при соблюдении условий (3) и (4), величина x может принимать значения из диапазона $0,5 \cdot 10^3 \dots 8 \cdot 10^3 \frac{\text{Вт} \cdot \sqrt{\text{с}}}{\text{м}}$. При этом минимальное значение коэффициента связи соответствует величине $x=0,5 \cdot 10^3 \frac{\text{Вт} \cdot \sqrt{\text{с}}}{\text{м}}$ и составляет $C_m = 8 \text{ Н/МВт}$.

Максимальное значение коэффициента связи соответствует величине $x=10^3 \frac{\text{Вт} \cdot \sqrt{\text{с}}}{\text{м}}$ и составляет $C_m = 200 \text{ Н/МВт}$. График зависимости C_m от x приведен на рисунке 3.

В диссертации для расчета изменения тангенциальной составляющей скорости ФКМ в геоцентрической системе координат используются соотношения:

$$\Delta V_{\Sigma} = \sum_{i=1}^{N_{\text{имп}}} \Delta V_{\text{имп } i}, \quad (7)$$

$$\Delta V_{\text{имп } i} = C_{mi} \cdot K_i \cdot J_{\text{ФКМ } i} \cdot S / m_i, \quad (8)$$

где i – номер импульса, $N_{\text{имп}}$ – число лазерных импульсов, которыми был облучен ФКМ за время воздействия, K – коэффициент, учитывающий особенности воздействия на ФКМ (K изменяется в диапазоне $0 \dots 1$); S – эффективная площадь воздействия (площадь фокального пятна, если она меньше площади поперечного сечения ФКМ, в противном случае $S = S_{\text{ФКМ}}$ – площадь ФКМ) [м^2]; m – масса ФКМ [кг].

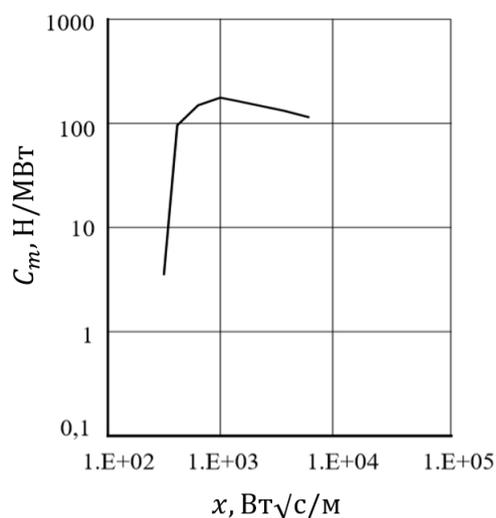


Рисунок 3 – Зависимость C_m от x для алюминия

При расчетах по соотношению (8) в диссертации приняты допущения:

1) Приведенный в соотношении (8) коэффициент K должен учитывать как особенности формы ФКМ, так и несовпадение точки приложения тяги реактивного факела, создаваемой при воздействии на ФКМ по лазерно-реактивному методу, с центром масс ФКМ.

Однако в научно-технической литературе, посвященной лазерно-реактивному методу, не приводится универсальных моделей, позволяющих учесть все многообразие форм ФКМ и влияние несовпадения точки приложения тяги, создаваемой реактивным факелом, с центром масс ФКМ. Поэтому, при определении коэффициента K , в диссертации приняты допущения, что ФКМ

имеет сферическую форму, а вектор скорости, создаваемый абляционным факелом, проходит через центр масс ФКМ и лежит в плоскости орбиты ФКМ. Соотношение, используемое в диссертации для расчета коэффициента K : $K = \cos(\gamma)$ (см. рисунок 4)).

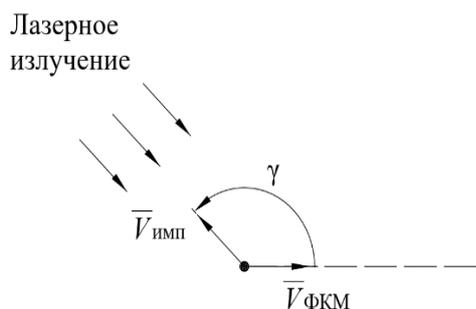


Рисунок 4 – К определению величины коэффициента K

2) Воздействие КЛЭУ на ФКМ по лазерно-реактивному механизму приводит к уменьшению его массы. Для ФКМ и сценариев воздействия, рассматриваемых в диссертации, величина снижения массы ФКМ за время воздействия мала и составляет 1-3% от общей массы ФКМ. Поэтому, в диссертации принято допущение,

что за время воздействия КЛЭУ на ФКМ его масса m не изменяется.

3) Основная причина появления ФКМ – техногенное засорение околоземного пространства. А так как одним из наиболее распространённых конструкционных материалов, используемых в КА, являются алюминий-магниевого сплавы, то при определении коэффициента связи C_m в диссертации принималось, что материалом ФКМ является алюминий.

Также во второй главе приведена методика определения величин $\eta_{\text{очистки}}$, $N_{\text{ФКМ}}^{\Sigma}$ и параметров режимов работы КЛЭУ.

Приведенная в главе методика определения величин $\eta_{\text{очистки}}$, $N_{\text{ФКМ}}^{\Sigma}$ и параметров режимов работы КЛЭУ на основе волоконных лазеров, решающей задачу очистки выбранной орбиты от опасных ФКМ, формулируется следующим образом:

1. Задаются исходные данные: $X_{\text{ФОС}}$ – вектор параметров ФОС; $X_{\text{ЛС}}$ – вектор параметров ЛС; $X_{\text{СО}}$ – вектор параметров СО; $X_{\text{цели}}$ – вектор параметров ФКМ; $X_{\text{фон}}$ – вектор параметров с наихудшими значениями фона внешней среды; $X_{\text{миссия}}$ – вектор параметров, учитывающий особенности миссии КА с КЛЭУ; минимальная величина $\Delta h_{\text{фкм}}$ (в настоящей работе $\Delta h_{\text{фкм}} = 100$ км).
2. Для заданной величины снижения орбиты ФКМ $\Delta h_{\text{фкм}}$ определяется эквивалентная величина изменения скорости ФКМ ΔV .
3. Для $X_{\text{ФОС}}$ и $X_{\text{ЛС}}$ определяются параметры зоны работы в режиме «Воздействие»:

$$Y_{\text{воз0}} = f_{\text{воз0}}(X_{\text{ФОС}}, X_{\text{ЛС}}) = (R_{\text{возд}}, r_{\text{возд}})^T,$$

где $r_{\text{возд}}$ – радиус проекции рабочей зоны в режиме «Воздействие» на плоскость, перпендикулярную вектору скорости КА с КЛЭУ [м], $R_{\text{возд}}$ – максимальная дальность работы КЛЭУ в режиме «Воздействие» [м], T – операция транспонирования матрицы.

4. Используя данные о плотности ФКМ для миссии с параметрами $X_{\text{миссия}}$, определяются поток ФКМ $F_{\text{ФКМ}}$, относительная скорость сближения $V_{\text{отн}}$ и плотность вероятности того, что при столкновении с КА ФКМ будет иметь угол $\alpha \pm 1^\circ$ по отношению к вектору скорости КА $P_{\text{ФКМ}}^\alpha(\alpha)$.
5. Определяются параметры режима «Обнаружение» для заданных $X_{\text{ЛС}}$, $X_{\text{ФОС}}$, $X_{\text{СО}}$, $X_{\text{цели}}$, $X_{\text{фон}}$, $X_{\text{миссия}}$ и рассчитанного на предыдущем шаге $R_{\text{возд}}$:

$$Y_{\text{обн}} = f_{\text{обн}}(X_{\text{ЛС}}, X_{\text{ФОС}}, X_{\text{СО}}, X_{\text{цели}}, X_{\text{фон}}, X_{\text{миссия}}, R_{\text{возд}}, F_{\text{ФКМ}}, V_{\text{отн}}) = \\ = (f_{\text{изм}}, t_{\text{скан}}, r_{\text{скан}}, r_{\text{лп}}, R_{\text{обн}}, N_{\text{ФКМ}}^\Sigma)^T$$

где $f_{\text{изм}}$ – частота следования лазерных импульсов в режиме «Обнаружение» [Гц], $t_{\text{скан}}$ – время сканирования зоны обнаружения [с]; $r_{\text{скан}}$ – радиальный размер проекции рабочей зоны КЛЭУ в режиме «Обнаружение» на направление, перпендикулярное вектору скорости КА с КЛЭУ [м]; $R_{\text{обн}}$ – максимальная дальность обнаружения цели с заданным размером [м].

6. Для заданных $X_{\text{ЛС}}$, $X_{\text{ФОС}}$ и значений $Y_{\text{возд}}$ и $N_{\text{ФКМ}}^\Sigma$ определяется число опасных ФКМ $N_{\text{ФКМ}}^{\Delta V}$, скорость которых была снижена на величину ΔV :

$$N_{\text{ФКМ}}^{\Delta V} = N_{\text{ФКМ}}^\Sigma \cdot \int_0^{r_{\text{возд}}} \int_0^{2\pi} \int_{-\frac{\pi}{2}}^{\frac{\pi}{2}} P_{\text{ФКМ}}^{\Delta V}(r, \varphi, \alpha, \Delta V, V_{\text{отн}}, X_{\text{ЛС}}) dr d\varphi d\alpha, \quad (4)$$

где α – угол между направлением вектора скорости КА с КЛЭУ и направлением вектора скорости ФКМ, $P_{\text{ФКМ}}^{\Delta V}(r, \varphi, \alpha, \Delta V, V_{\text{отн}}, X_{\text{ЛС}})$ – вероятность того, что скорость ФКМ будет изменена на величину из заданного диапазона значений ΔV .

Для расчета вероятности $P_{\text{ФКМ}}^{\Delta V}(r, \varphi, \alpha)$ в настоящей работе предложено соотношение:

$$P_{\text{ФКМ}}^{\Delta V}(r, \varphi, \alpha, \Delta V, V_{\text{отн}}, X_{\text{ЛС}}) = P_{\text{ФКМ}}^\alpha(\alpha) \frac{S^{\text{ФКМ}}(\alpha, \varphi, r, \Delta V, V_{\text{отн}}, X_{\text{ЛС}})}{S_{\text{возд}}}, \\ S_{\text{возд}} = \pi \cdot (r_{\text{возд}})^2,$$

где $S^{\text{ФКМ}}(\alpha, \varphi, r, \Delta V)$ – часть зоны $S_{\text{возд}}$, в которой скорость ФКМ, влетающего в рабочую зону в режиме «Воздействие» под углом α , будет изменена на величину, принадлежащую диапазону скоростей ΔV .

Выходные параметры можно разделить на две группы:

- 1) параметры режима «Воздействие» $(N_{\text{ФКМ}}^{\Delta V}, R_{\text{возд}}, r_{\text{возд}})^T$;
- 2) параметры режима «Обнаружение» $(N_{\text{ФКМ}}^{\Sigma}, f_{\text{изм}}, t_{\text{скан}}, r_{\text{скан}}, r_{\text{лп}}, R_{\text{обн}})^T$.

Третья глава посвящена разработке методики определения массы КА с КЛЭУ на основе волоконных лазеров, решающей задачу очистки выбранной орбиты от опасных ФКМ, и определению исходных данных и параметров такой КЛЭУ.

Для достижения, требуемого для очистки выбранной орбиты от опасных ФКМ, значения энергии в импульсе КЛЭУ на основе волоконных лазеров в диссертации предлагается использовать технологию когерентного сложения лазерных пучков. Ключевой особенностью данной технологии является то, что для обеспечения больших энергий в импульсе складывается излучение N усилительных каналов, синхронизированных по фазе. Функциональная схема СГ ЛС на основе данной технологии приведена на рисунке 5.

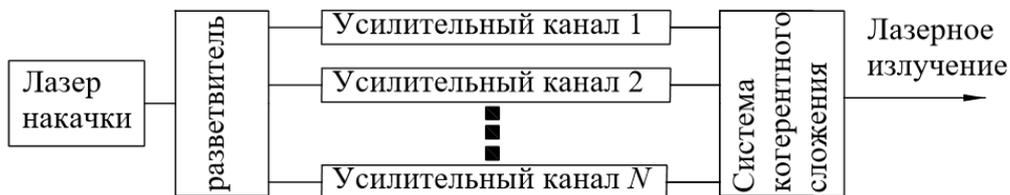


Рисунок 5 – Функциональная схема СГ ЛС

При расчетах КЛЭУ на основе волоконных лазеров в качестве исходных данных в работе использованы технические параметры системы, разработанной в рамках международной программы ICAN:

- 1) максимальное число усилительных каналов $N=10000$;
- 2) максимальная энергия, генерируемая одним усилительным каналом – 1 мДж;
- 3) максимальная частота следования лазерных импульсов – 1000 Гц;
- 4) длительность лазерного импульса $10^{-9} \dots 10^{-15}$ с;
- 5) длина волны лазерного излучения – 1,06 мкм;
- 6) эффективность системы когерентного сложения – 0,7 (величина энергии в угле,

соответствующем расходимости лазерного излучения, составляет 0,7 от всей энергии в импульсе).

Поскольку значение КПД ЛС КЛЭУ на основе волоконных лазеров лежит в диапазоне 0,2 ... 0,5, то усредненный КПД ЛС КЛЭУ в диссертации принят равным $\eta_{лс}=0,3$.

Методику определения массы КА с КЛЭУ можно представить в виде блок – схемы, приведенной на рисунке 6.

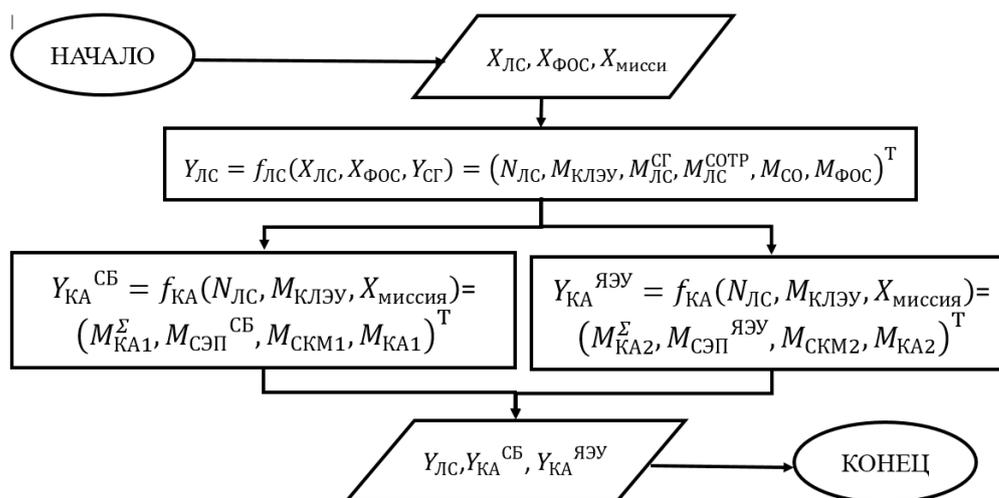


Рисунок 6 – Блок-схема методики определения массы КА с КЛЭУ

Выходные параметры можно записать в следующем виде:

$$Y_{КА}^{СБ} = (M_{КА1}^{\Sigma}, M_{СЭП}^{СБ}, M_{СКМ1}, M_{КА1})^T,$$

$$Y_{КА}^{ЯЭУ} = (M_{КА2}^{\Sigma}, M_{СЭП}^{ЯЭУ}, M_{СКМ2}, M_{КА2})^T,$$

$$Y_{ЛС} = (M_{КЛЭУ}, M_{ЛС}, M_{ЛС}^{СГ}, M_{ЛС}^{СОТР}, M_{СО}, M_{ФОС})^T,$$

где $M_{КЛЭУ}$ – масса КЛЭУ [кг]; $M_{ЛС}^{СГ}$ – масса СГ ЛС [кг]; $M_{ЛС}^{СОТР}$ – масса СОТР ЛС [кг]; $M_{СО}$ – масса СО [кг]; $M_{ФОС}$ – масса ФОС [кг]; $M_{КА}$ – масса прочих подсистем КА [кг]; $M_{СЭП}^{СБ}$ и $M_{СЭП}^{ЯЭУ}$ – масса СЭП на основе СБ и СЭП на основе ЯЭУ соответственно [кг]; $M_{КА1}^{\Sigma}$, $M_{СКМ1}$, $M_{КА1}$ – массы КА с КЛЭУ, СКМ и прочих систем КА для СЭП на основе СБ; $M_{КА2}^{\Sigma}$, $M_{СКМ2}$, $M_{КА2}$ – массы КА с КЛЭУ, СКМ и прочих систем КА для СЭП на основе ЯЭУ; $N_{ЛС}$ – электрическая мощность, требуемая для обеспечения работы ЛС КЛЭУ [кВт].

В четвертой главе обобщены результаты, полученные во второй и третьей главах и предложена методика, позволяющая проводить параметрический синтез

КЛЭУ на основе волоконных лазеров, решающей задачу очистки выбранной орбиты от опасных ФКМ, определять массу КА с КЛЭУ и эффективность применения такой КЛЭУ. Методика учитывает ограничения по массе КА с КЛЭУ $(M_{\text{КЛЭУ}})_{\text{макс}}$. На рисунке 6 приведена блок-схема предложенной методики.

Выходными параметрами являются масса КА с КЛЭУ на основе волоконных лазеров $M_{\text{КА}}^{\Sigma}$ и значение показателя эффективности применения КЛЭУ для очистки выбранной орбиты от опасных ФКМ $\eta_{\text{очистки}}$ и величина обнаруживаемых КЛЭУ опасных ФКМ за год $N_{\text{ФКМ}}^{\Sigma}$. Методику параметрического синтеза КА с КЛЭУ можно представить в виде блок – схемы, приведенной на рисунке 7.

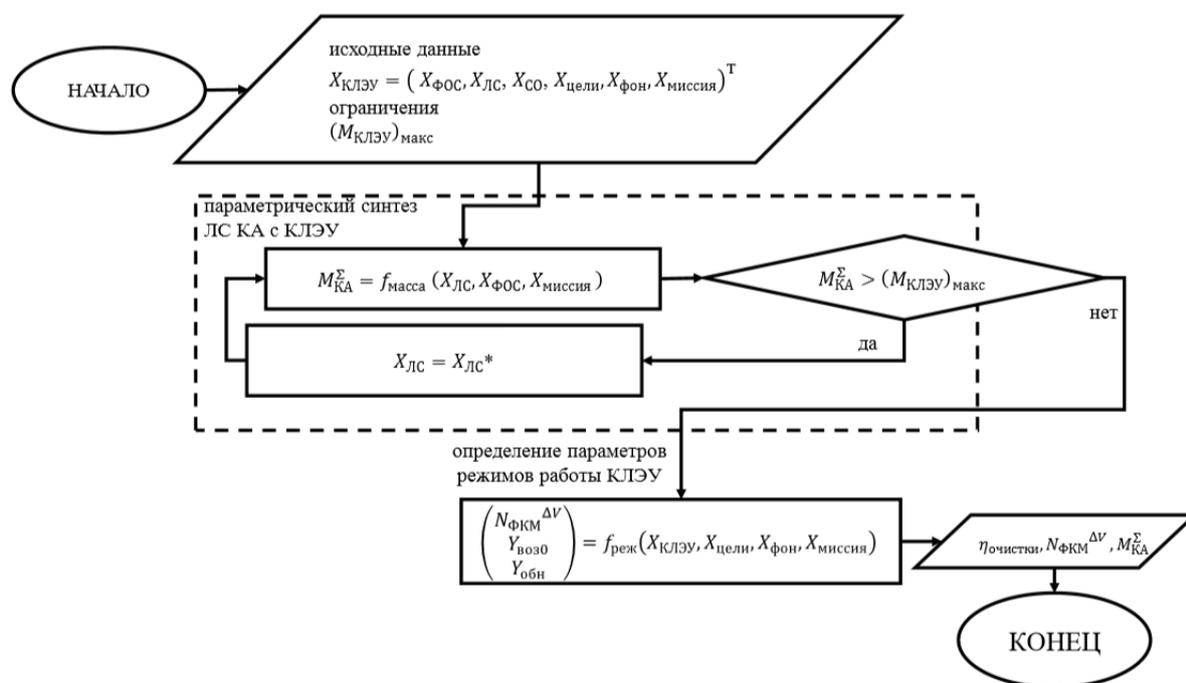


Рисунок 7 – Блок-схема методики параметрического синтеза КЛЭУ

На основании предложенной методики проведен расчет массы КА с КЛЭУ и эффективности применения КЛЭУ для орбит базирования 450 км и 850 км, и параметров ЛС КЛЭУ, приведенных в таблице 2.

Таблица 2 – Основные параметры ЛС рассматриваемых вариантов КА с КЛЭУ

СЭП	Параметр	Вариант 1	Вариант 2	Вариант 3	Вариант 4
ЯЭУ	$E_{\text{лс}}, \text{Дж}$	10	30	10	30
	$D_{\text{лс}}, \text{м}$	1	1	3	3
СБ	$E_{\text{лс}}, \text{Дж}$	10	30	10	30
	$D_{\text{лс}}, \text{м}$	1	1	3	3

Рассчитанная масса рассматриваемых вариантов КА с КЛЭУ и число удаляемых ими с занимаемой орбиты ФКМ (наклонение каждой орбиты 55°), базирующихся на высотах 450 км и 850 км, приведены в таблицах 3 и 4 соответственно.

Таблица 3 – Основные параметры КА с КЛЭУ с СЭП на основе СБ и ЯЭУ, базирующихся на высоте 450 км

СЭП на основе	Вариант	$\overline{P_{сг}}$, кВт	M _{КЛЭУ} , кг	r _{скан} , км	η _{очистки} для диапазонов Δh _{ФКМ} :			Общая эффективность η _{очистки} (Δh _{ФКМ} не менее 100 км)
					100...250 км	250...350 км	≥350 км	
СБ	1	10	3988	0,85	-	-	-	-
	2	30	9169	0,88	0,10	-	-	0,10
	3	10	4280	1,5	0,10	0,01	-	0,11
	4	30	9458	2,3	0,19	0,06	0,09	0,34
ЯЭУ	1	10	6292	0,85	0,01	-	-	-
	2	30	9572	0,88	0,15	0,02	-	0,17
	3	10	6616	1,5	0,13	0,02	-	0,15
	4	30	9896	2,3	0,27	0,08	0,12	0,47

Таблица 4 – Основные параметры КА с КЛЭУ с СЭП на основе СБ и ЯЭУ, базирующихся на высоте 850 км

СЭП на основе	Вариант	$\overline{P_{сг}}$, кВт	M _{КЛЭУ} , кг	r _{скан} , км	η _{очистки} для диапазонов Δh _{ФКМ} :			Общая эффективность η _{очистки} (Δh _{ФКМ} не менее 100 км)
					100...400 км	400...750 км	>750 км	
СБ	1	10	3734	0,85	0,01	-	-	0,01
	2	30	9040	0,88	0,06	-	-	0,06
	3	10	4026	1,5	0,15	-	-	0,15
	4	30	9332	2,3	0,31	0,07	0,02	0,4
ЯЭУ	1	10	6338	0,85	0,02	-	-	0,02
	2	30	9647	0,88	0,19	-	-	0,19
	3	10	6665	1,5	0,18	-	-	0,18
	4	30	9974	2,3	0,39	0,09	0,03	0,51

Различное количество удаляемых ФКМ при работе КЛЭУ в одинаковом режиме на основе двух различных типов СЭП объясняется тем, что коэффициент, учитывающий перерывы в работе КЛЭУ (далее коэффициент использования орбиты), для КЛЭУ с СЭП на основе СБ в настоящей работе принимался равным $Z_{\text{КЛЭУ}} = 0,7 \dots 0,8$ (КЛЭУ с СЭП на основе СБ не работала в моменты затенения). Работа КЛЭУ с СЭП на основе СБ с коэффициентом $Z_{\text{КЛЭУ}} = 1$, в зависимости от времени миссии, привела бы к увеличению массы КЛЭУ на величину порядка 1...5 т. В результате чего использование СБ в составе СЭП не давало бы преимущества по массе КА с КЛЭУ по сравнению с массой КА с КЛЭУ при использовании ЯЭУ в составе СЭП.

Согласно конвенции о ядерной безопасности, принятой 5 июля 1994 г., запуск СЭП на основе ЯЭУ может осуществляться лишь на орбитах, высоты которых превышают 800 км. Поэтому, применение КЛЭУ с СЭП на основе ЯЭУ, базирующейся на орбите с высотой 450 км, рассмотрено в диссертации лишь для качественного сравнения характеристик КЛЭУ на основе различных СЭП.

В результате можно сформулировать рекомендации по выбору типа СЭП в зависимости от ограничений на массу и орбиты базирования КА с КЛЭУ, а также режима работы ЛС КЛЭУ на основе волоконных лазеров:

1. В составе СЭП КА с КЛЭУ на основе волоконных лазеров рекомендуется использовать СБ при:

- ограничениях на максимальную массу КА с КЛЭУ величиной 6 т;
- орбитах базирования КА с КЛЭУ с высотами менее 800 км;
- работе ЛС КЛЭУ в режиме, мощность лазерного излучения в котором эквивалентна мощности лазерного излучения в непрерывном режиме менее 30 кВт, и условии, что КЛЭУ не проводит очистку выбранной орбиты от опасных ФКМ в моменты затенения СБ.

2. В составе СЭП КА с КЛЭУ на основе волоконных лазеров рекомендуется использовать ЯЭУ:

- при высоте орбиты базирования более 800 км и величине массы КА с КЛЭУ свыше 6 т;

- для достижения наибольшей эффективности очистки выбранной орбиты от опасных ФКМ и наименьшей массы КА с КЛЭУ на основе волоконных лазеров при времени миссии ≈ 10 лет;
- при работе ЛС на основе волоконных лазеров в режиме, мощность лазерного излучения в котором эквивалентна мощности лазерного излучения в непрерывном режиме ≥ 10 кВт.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

При достижении поставленных в настоящей диссертации задач были получены следующие результаты:

1. Сформирован структурный облик КЛЭУ на основе волоконных лазеров для очистки выбранной орбиты от опасных ФКМ.
2. Для КЛЭУ на основе волоконных лазеров разработаны методики:
 - определения параметров режимов работы КЛЭУ и эффективности ее применения для очистки выбранной орбиты от опасных ФКМ;
 - определения массы КА с КЛЭУ на основе волоконных лазеров для очистки околоземного пространства от опасных ФКМ;
 - параметрического синтеза КЛЭУ на основе волоконных лазеров, решающей задачу очистки выбранной орбиты от опасных ФКМ.
3. Полученные в работе результаты позволяют сделать следующие выводы о использовании СЭП с СБ и СЭП с ЯЭУ в составе КЛЭУ на основе волоконных лазеров:
 - Для очистки от опасных ФКМ орбит с высотами менее 800 км или при ограничении массы КА с КЛЭУ величиной 6 т, в составе КЛЭУ предложено использовать СЭП на основе СБ.
 - Для очистки от опасных ФКМ орбит с высотами более 800 км и при режиме работы ЛС с мощностью лазерного излучения, эквивалентной мощности лазерного излучения в непрерывном режиме более 10 кВт, в составе КЛЭУ рекомендовано использовать СЭП на основе ЯЭУ.

СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ СОИСКАТЕЛЯ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Публикации в рецензируемых научных изданиях

1. Авдеев А. В., Каторгин Б. И., Метельников А. А. Методика расчета энергетических характеристик подсистем мобильных многофункциональных лазерных энергетических установок на основе волоконных лазеров// Вестник МАИ 2019. Т. 26. № 2. С. 61-69.
2. Авдеев А.В., Метельников А.А. Теоретическая разработка лидарной установки космического базирования на основе непрерывного химического DF-лазера для мониторинга атмосферы // Труды МАИ, 2015 г., выпуск № 81: <https://www.mai.ru/science/trudy/published.php?ID=57833>
3. Авдеев А.В., Метельников А.А. Бортовая лазерная силовая установка для борьбы с космическим мусором// Труды МАИ, 2016, №89: https://mai.ru/upload/iblock/28b/avdeev_melnikov_rus.pdf
4. Avdeev A., Boreysho A., Ivakin S., Katorgin B., Metelnikov A. Nuclear powered spaceborne laser for orbital debris removal // PROCEEDINGS OF SPIE, 11042, XXII International Symposium on High Power Laser Systems and Applications, 1104211 (3 January 2019); doi: 10.1117/12.2522456

Публикации, приравненные к публикациям в рецензируемых научных изданиях

5. Авдеев А.В. Метельников А.А. «Оценка параметров орбиты космического объекта при изменении его результирующего вектора скорости» Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2018666280 от 13.12.2018 г.

Другие публикации

6. Авдеев А.В., Метельников А.А. Методика анализа параметров подсистем генерации и формирования лазерного излучения мобильных многофункциональных лазерных энергетических установок // XLV Международная молодежная научная конференция Гагаринские чтения – 2019, Сборник тезисов докладов (Москва, 16-19 апреля 2019). – М.: МАИ, 2019, – С. 149 (1345 с.).
7. Авдеев А.В., Метельников А.А. Многофункциональные лазерные энергетические установки на основе волоконных лазеров // 17-ая Международная конференция «Авиация и космонавтика-2018», Тезисы (Москва, 19-23 ноября 2018 г) . – М.: Типография «Люксор», 2018, – С. 91-92 (740 с.)
8. Авдеев А.В., Владенков А.В., Ивакин С.В., Метельников А.А. Применение пассивной и активной защиты для космических аппаратов в околоземном пространстве // XLIV Международная молодежная научная конференция Гагаринские чтения – 2018, Сборник тезисов докладов, том 1 (Москва, 17-20 апреля 2018 г). – М.: МАИ, 2018, – С. 183 (393 с.).
9. Авдеев А.В., Метельников А.А. Локационный канал многофункциональной лазерной энергетической установки// 9-й Всероссийский межотраслевой молодежный

конкурс научно-технических работ и проектов «Молодежь и будущее авиации и космонавтики». Аннотации конкурсных работ. М.: МАИ, 2017. С. 76-78.

10. Авдеев А.В. Метельников А.А. Приемный канал бортовой лазерной энергоустановки // XLIII Международная молодежная научная конференция Гагаринские чтения – 2017, тезисы докладов (Москва, 5-19 апреля 2017 г). – М.: МАИ, 2017, – С. 572-573 (1479 с.).

11. Авдеев А.В. Владенков А.В., Ивакин С.В., Метельников А.А. Система маневрирования космического аппарата с лазерной энергоустановкой, предназначенной для борьбы с космическим мусором // 16-ая Международная конференция «Авиация и космонавтика-2017». Тезисы (Москва, МАИ 20-24 ноября 2017). – М.: Типография «Люксор», 2017, – С. 86-87 (732 с.).

12. Авдеев А.В., Ивакин С.В., Погода А.П., Метельников А.А. Твердотельные ОВФ-лазеры для решения космических задач // 16-ая Международная конференция «Авиация и космонавтика-2017». Тезисы (20-24 ноября 2017 г. – М.: Типография «Люксор», 2017, – С. 109-110 (732 с.).

13. Авдеев А.В., Метельников А.А. Разработка системы автоюстировки для лазерной бортовой энергетической установки // XLII Международная молодежная научная конференция Гагаринские чтения – 2016, сборник тезисов докладов, том 3 (Москва, 12-15 апреля 2016). – М.: МАИ, 2016, – С. 716-717 (750 с.).

14. Авдеев А.В., Метельников А.А. Системная модель передающего канала лазерной бортовой энергоустановки для борьбы с космическим мусором // Альманах мировой науки. Люберцы: АР-Консалт, 2016 г., №10-1 (13), С. 77-79.

15. Авдеев А.В., Метельников А.А. Обоснование требований к точности наведения лазерной бортовой энергоустановки для борьбы с космическим мусором// Конкурс научно-технических работ и проектов «Молодежь и будущее авиации и космонавтики». Аннотации конкурсных работ. – М.: МАИ, 2016. С. 84.

16. Авдеев А.В. Метельников А.А. Теоретическая разработка лидарной установки космического базирования на основе DF-НХЛ для мониторинга атмосферы // 13-ая международная конференция «Авиация и космонавтика – 2014». Тезисы докладов. (Москва, 17-21 ноября 2014). – СПб: Мастерская печати, 2014, – С. 267-268 (712 с.).

Работа выполнена в рамках базовой части государственного задания №13.9211.2017/8.9 Министерства науки и высшего образования РФ.