

На правах рукописи



**Авдеев Алексей Валерьевич**

**Расчетно-теоретическое исследование характеристик и обоснование  
возможности создания многоцелевой космической энергоустановки  
на основе фтороводородных непрерывных химических лазеров**

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

Специальность 01.04.21  
«Лазерная физика»

**АВТОРЕФЕРАТ**  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Москва – 2014

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)»

**Научный руководитель:** доктор технических наук, профессор, академик РАН

**Каторгин Борис Иванович**

**Официальные оппоненты:** **Солдатов Валерий Иванович,**  
доктор технических наук,  
Государственный научный центр РФ ОАО  
«Национальный центр лазерных систем и комплексов «Астрофизика», главный научный сотрудник

**Троценков Сергей Викторович,**  
кандидат физико-математических наук,  
ОАО «Объединенная двигательная корпорация», начальник отдела ракетных двигателей

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

Защита диссертации состоится «6» октября 2014 года в 13 ч. 00 мин. на заседании диссертационного совета Д212.125.08, созданного на базе федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)» (МАИ) по адресу: 125993, г. Москва, Волоколамское шоссе, д. 4.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте Московского авиационного института (национального исследовательского университета), [http://mai.ru/events/defence/index.php?ELEMENT\\_ID=49996](http://mai.ru/events/defence/index.php?ELEMENT_ID=49996)

Автореферат разослан “\_\_” \_\_\_\_\_ 2014 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета Д212.125.08,  
д.т.н., профессор

Зуев Юрий Владимирович

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

### Актуальность темы исследования

Интерес к фтороводородным непрерывным химическим лазерам (НХЛ) связан с возможностью эффективного непосредственного преобразования внутренней химической энергии веществ, находящихся в баках системы хранения, в когерентное излучение, минуя другие стадии преобразования. Химический КПД НХЛ значительно превосходит КПД других лазеров и достигает  $\sim 15\%$ , что позволяет получать высокую мощность излучения, недостижимую для других типов лазеров.

Принципиальная схема лазерной энергоустановки на основе HF(DF)-НХЛ показана на рисунке 1. Автономный HF(DF)-НХЛ состоит из следующих основных частей: генератора активной среды (ГАС), обеспечивающего формирование активной среды с максимально возможным энергозапасом и высоким оптическим качеством; оптического резонатора, обеспечивающего преобразование запасенной в активной среде энергии возбужденных молекул в лазерное излучение; сверхзвукового диффузора, преобразующего сверхзвуковой поток лазерных газов в дозвуковой; теплообменника для снижения температуры отработанных лазерных газов и тем самым снижения расхода эжектирующего газа; газоструйного эжектора для откачки отработанных лазерных газов, устанавливаемого в том случае, когда появляется необходимость обеспечения выхлопа в атмосферу (при воздушном, морском и наземном базировании); в случае космического базирования необходимость в использовании газоструйного эжектора отпадает; системы хранения и подачи компонентов (на рисунке 1 не показана).

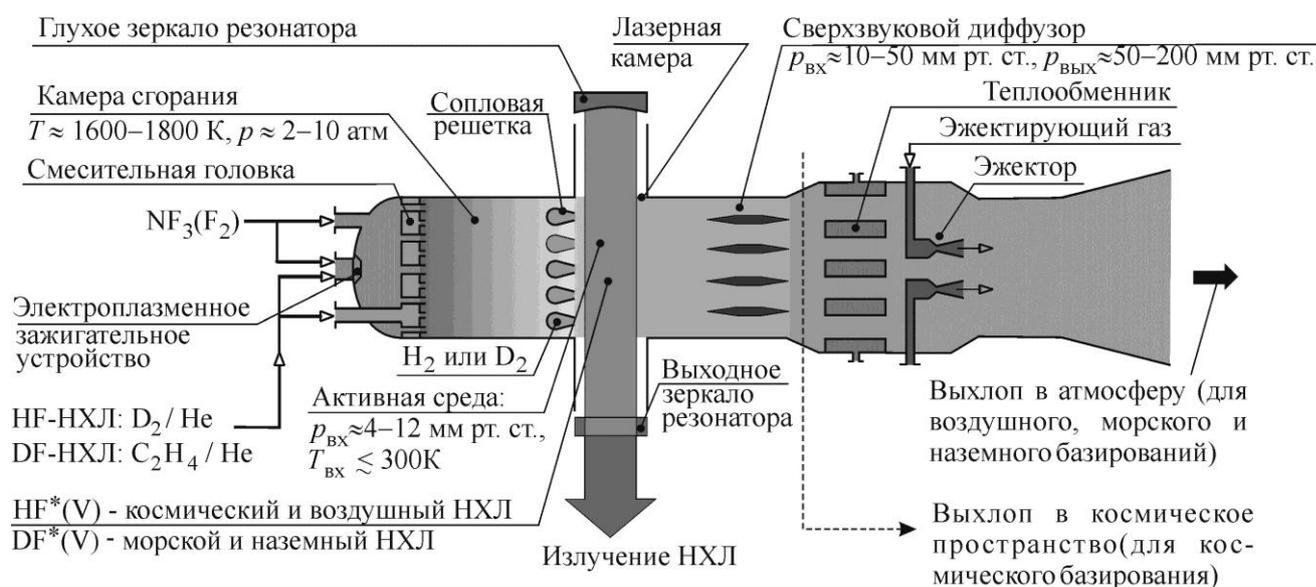


Рисунок 1 – Принципиальная схема HF(DF)-НХЛ различных видов базирования.

В ОАО «НПО Энергомаш им. акад. В.П. Глушко» были созданы фтороводородные НХЛ наземного и воздушного базирования, работающие в непрерывном режиме, со среднеразмерным ГАС МГ5 и крупноразмерным ГАС Н00. По сравнению с непрерывным режимом генерации, импульсно-периодический режим (ИПР) во фтороводородных химических лазерах с непрерывной накачкой мало изучен, хотя при его реализации мог бы представлять большой интерес в прикладном плане. Средняя мощность в ИПР ниже, чем мощность непрерывного излучения, при этом пиковая мощность импульсов в десятки раз может превышать мощность излучения непрерывного режима. Высокая средняя мощность, свойственная НХЛ, позволит в случае реализации ИПР получать сверхвысокую пиковую мощность в импульсе.

ИПР в HF-НХЛ впервые теоретически был рассмотрен в СССР в 1979 году. С тех пор интерес к данной теме не угасает, и до сих пор ведутся работы по теоретическому и расчетному исследованиям ИПР в HF-НХЛ. Однако в открытой литературе на сегодняшний день нет системных решений получения на практике высокочастотных сверхмощных импульсов при том, что область применения таких импульсов могла бы быть довольно большой. При этом следует отметить, что для максимальной энергетической эффективности HF-НХЛ частота повторения импульсов излучения определяется скоростью восстановления инверсии населенности в активной среде и должна составлять  $f=10^5$  Гц.

Целью данной работы является теоретическое исследование и разработка системы получения высокочастотного сверхмощного ИПР в энергоустановке на основе HF(DF)-НХЛ. Помимо этого показана возможность размещения такой энергоустановки на борту КА, выводимого в космос для решения следующих задач: защиты КА и очистки околоземного пространства от опасных ФКМ, подпитки энергией аккумуляторных батарей (АКБ) КА, и мониторинга приземной атмосферы.

В последние годы большое внимание уделяется изучению возможности использования лазерных энергоустановок для очистки околоземного пространства от фрагментов космического мусора (ФКМ), которые накопились за все время эксплуатации космоса и создают в ряде случаев большую угрозу для космических аппаратов (КА). Наиболее опасный диаметр ФКМ для КА – это 1...10 см, так как такие ФКМ не видны на экранах радиолокаторов и избежать столкновения с ними путем маневрирования не возможно. Сейчас число таких ФКМ в космическом пространстве составляет около 600 тысяч.

Для увода ФКМ с орбиты необходимо уменьшить скорость его движения. При облучении ФКМ мощным непрерывным лазерным излучением возникающая плазма будет экранировать его поверхность. Чтобы избежать этого, нужно использовать импульсный режим облучения. В этом случае испарение материала ФКМ при облучении его поверхности сопровождается образованием эрозионного плазменного факела, который может создавать значительный реактивный импульс отдачи, приводящий к изменению скорости ФКМ на необходимую величину. Причем интервал между лазерными импульсами должен быть таким, чтобы плазма за это время успевала бы разлететься и не экранировала бы прохождение следующего импульса.

Для очистки околоземного космического пространства разрабатываются различные проекты. Например, проект «Орион» (США), в котором для наблюдения и воздействия на ФКМ предполагается использовать наземную энергоустановку на основе твердотельного лазера. В лаборатории «Sandia» рассматривается возможность удаления ФКМ с орбит КА с помощью системы «FALCON» с мощностью излучения 5 МВт, зеркалом диаметром 10 м и накачкой продуктами ядерных реакций, излучающей на длине волны 1,73 мкм. В проекте «SELENE» предполагается использовать мощный лазер наземного базирования на свободных электронах. Но все эти способы имеют существенные недостатки, связанные с необходимостью прохождения излучения большой мощности в атмосфере, что приведет к потере оптического качества пучка излучения и возникновению нелинейных эффектов. К тому же наземные лазеры невозможно использовать в облачную погоду. Они имеют малую мобильность, поэтому число ФКМ, которые можно подвергнуть воздействию их излучения, будет довольно ограниченным. В лазерах космического базирования эти недостатки отсутствуют, поэтому представляет определенный интерес и актуальность разработка многоцелевой космической лазерной энергоустановки (МКЛЭУ), использующей фтороводородный НХЛ, не требующий для своей работы потребления электричества. Задача будет состоять только в доставке на орбиту для этой установки компонентов лазерного топлива и ее дозаправки.

Переходя ко второй задаче, следует отметить, что в последнее время все больший интерес вызывает проблема использования лазерного излучения для дистанционной передачи энергии с целью подпитки АКБ различных КА для продления срока их службы и существенного снижения массы АКБ. Использование для этих целей лазерного излучения дает существенные преимущества перед использованием другого источника энер-

гии - СВЧ излучения миллиметрового или сантиметрового диапазона. В случае использования лазерного излучения размеры формирующего телескопа и приемных элементов на много порядков меньше, чем в случае использования СВЧ антенн. По оценкам экспертов применение лазеров для подпитки АКБ КА может увеличить срок их службы с нынешних ~10 лет до ~20 лет. Таким образом, предлагается использовать рассматриваемую в данной работе МКЛЭУ при её работе в непрерывном режиме излучения и для подпитки энергией АКБ КА.

Еще одной областью применения излучения такой МКЛЭУ является дистанционный контроль экологической обстановки в приземной атмосфере. На сегодняшний день установки для лазерного мониторинга атмосферы созданы для работы в земной атмосфере, но из-за токсичности выхлопа фтороводородных лазеров их применение для этих целей весьма ограничено. В то же время спектр излучения DF-НХЛ (3,55 ...4,05 мкм) слабо поглощается атмосферой и совпадает со спектром поглощения очень большого числа атмосферных газов. В их число входят: CO<sub>2</sub>, N<sub>2</sub>O, NO, SO<sub>2</sub>, HCl, C<sub>3</sub>H<sub>8</sub>, HDO, H<sub>2</sub>O, HF и различные углеводороды. С помощью DF-НХЛ могут быть обнаружены такие соединения, как аммиак, этилен, гидразин, озон, толуол, трихлорэтилен, ксилол, арсин и т.д. Следовательно, МКЛЭУ может быть использована для исследования газового состава атмосферы, а также для нахождения утечек из газовых магистралей. Причем, как и в большинстве локационных систем, при мониторинге атмосферы необходим ИПР излучения.

**Целью и задачами работы** является создание физико-математической модели системы формирования импульсно-периодического излучения HF-НХЛ; исследование и теоретическая разработка системы получения импульсно-периодического HF-излучения с частотой ~ 100 кГц, длительностью импульсов 10 нс и энергией в импульсе ~ 1 Дж в МКЛЭУ при использовании непрерывной накачки активных сред в ГАС автономных HF(DF)-НХЛ; разработка компоновочной схемы МКЛЭУ на борту КА для обеспечения защиты КА от опасных ФКМ и очистки околоземного пространства, подпитки энергией АКБ КА и мониторинга приземной атмосферы, расчетно-теоретическое исследование энергетических и массо-габаритных характеристик МКЛЭУ.

**Объектом исследования** являются подсистемы многоцелевой космической лазерной установки на основе автономных непрерывных химических HF- и DF-лазеров,

генерирующих излучение как в непрерывном, так и в импульсно-периодическом режимах.

**Предметом исследования** являются параметры излучения МКЛЭУ, физические аспекты работы основных частей установки, технические аспекты перевода излучения из непрерывного в импульсно-периодический режим с необходимыми параметрами, компоновка МКЛЭУ на борту КА, выводимого в космос и задачи, которые может выполнять МКЛЭУ.

**Методом исследования** является использование созданной физико-математической модели системы формирования импульсно-периодического излучения НФ-НХЛ, основанной на уравнениях перераспределения заселенности лазерных уровней при формировании короткого импульса в активной среде (АС), уравнениях распространения и формирования усиленного спонтанного излучения (УСИ) в АС, экспериментальных данных по лучевой стойкости электрооптических затворов CdTe.

#### **Научная новизна исследования**

1. Предложено и обосновано применение в оптической схеме системы формирования импульсно-периодического силового излучения вида задающий генератор (ЗГ) с двумя электрооптическими затворами – предусилитель (ПУМ) – окончательный усилитель мощности (ОУМ), обеспечивающей получение цуга мощных импульсов лазерного излучения (длительность  $\sim 10$  нс, частота повторения 100 кГц, энергия в импульсе  $\sim 1$  Дж, пиковая мощность  $\sim 10^8$  Вт).

2. Оценена предельная длина активной среды в ОУМ (260 см при среднем коэффициенте усиления  $0,06 \text{ см}^{-1}$ ), обусловленная возникновением вредного мощного усиленного спонтанного излучения в момент времени между импульсами излучения, когда усилительные свойства активной среды в НФ-усилителе восстанавливаются до прежнего уровня, что может привести к существенному снижению запасенной в активной среде НФ-усилителя энергии ко времени прихода очередного импульса излучения на вход усилительных каскадов.

3. Разработана оптическая система совмещения силового канала излучения МКЛЭУ и принимающего локационного канала МКЛЭУ. Обосновано использование в качестве приемного локационного телескопа выходного телескопа силового канала излучения с диаметром главного зеркала 1 м, что позволяет снизить массогабаритные характеристики разрабатываемой лазерной энергоустановки.

4. Найдены условия получения генерации лазерного излучения в нескольких спектральных диапазонах на молекулах DF (3,55 ... 4,05 мкм) для обеспечения лазерного мониторинга атмосферы из космоса. Показано, что для обнаружения территорий с надфоновыми концентрациями углеводородных газов достаточно использовать только ЗГ с ПУМ без ОУМ.

5. Показана принципиальная возможность использования МКЛЭУ для увода ФКМ с наиболее опасными размерами от 1 до 10 см с орбиты защищаемых КА и очистки околоземного пространства, подпитки энергией АКБ КА и мониторинга приземной атмосферы.

#### **Теоретическая и практическая значимость исследования**

Полученные результаты могут быть использованы:

- предприятиями и организациями при разработке фтороводородных НХЛ для получения импульсно-периодического режима излучения, когда при некотором снижении средней мощности могут быть получены сверхвысокие мощности в импульсе (превышающие  $10^8$  Вт), превосходящие на порядки соответствующие значения, достигнутые в непрерывном режиме генерации;

- предприятиями Федерального космического агентства, где ищутся пути решения одной из актуальнейших проблем – защите космических аппаратов от опасных ФКМ, подпитке энергией КА;

- организациями экологического мониторинга атмосферы, осуществляющими дистанционный контроль экологической обстановки в приземной атмосфере и обнаружение потенциальных газовых и нефтяных месторождений по газовым выбросам над ними и утечек в газовых магистралях, геолого-разведывательными организациями.

#### **Степень достоверности результатов**

Достоверность полученных результатов подтверждается использованием комплексного подхода к разработке расчетно-теоретических основ создания основных составных частей МКЛЭУ, опирающегося на расчетные модели, прошедшие апробацию на существующих прототипах агрегатов и узлов этих частей. При обосновании применения в ЗГ системы получения импульсно-периодического излучения электрооптических затворов на основе кристалла CdTe за основу были взяты экспериментальные параметры лучевой стойкости этих кристаллов из американской работы по реальному получению ИПР в ИК диапазоне с длительностью импульса 10 нс. Кроме того, достовер-

ность полученных результатов подтверждается выбором в качестве прототипов ГАС ЗГ-ПУМ и ОУМ ГАС МГ5 и Н00 соответственно, разработанных в НПО «Энергомаш», которые успешно были испытаны на стендах и суммарно наработали несколько часов без сбоев, показав свою надежность. Помимо вышеперечисленного, при расчете воздействия излучения на ФКМ за основу брались экспериментальные данные из американского проекта «ORION» по исследованию импульса отдачи разных материалов при воздействии на них лазерного излучения в вакууме.

#### **Личный вклад соискателя**

1. Соискателем предложена система формирования мощного импульсно-периодического HF-излучения в МКЛЭУ при использовании непрерывной накачки активных сред в ГАС автономных HF(DF)-НХЛ.

2. Соискателем разработана и результативно использована модель, описывающая распространение усиленного спонтанного излучения (УСИ) в ОУМ.

3. Обоснована возможность размещения рассматриваемой в данной работе МКЛЭУ на КА, выводимом в космос ракетой-носителем «Протон-М».

4. На основе созданной модели изменения динамики и траектории полета ФКМ, движущихся по эллиптическим орбитам, при воздействии на них импульсно-периодического лазерного излучения разрабатываемой МКЛЭУ, разработан численный алгоритм, и создана соответствующая расчётная программа. Обоснована возможность применения разрабатываемой МКЛЭУ для мониторинга приземной атмосферы из космоса и для подпитки АКБ КА с целью уменьшения их массы.

#### **Основные положения, выносимые на защиту**

1. Система формирования импульсно-периодического излучения в HF-лазере с непрерывной накачкой АС с частотой  $\sim 100$  кГц, длительностью импульсов 10 нс и энергией  $\sim 1$  Дж. Модель расчета распространения и усиления УСИ в АС HF-НХЛ и результаты расчета возможности подавления усиленного спонтанного излучения в ОУМ.

2. Расчётная оптимизация характеристик распространения и усиления усиленного спонтанного излучения в ОУМ, в результате чего найдена предельная длина ОУМ.

3. Формирующая силовое излучение и информационно-прицельная системы излучения МКЛЭУ с выходным формирующим телескопом Кассегрена. Метод совмещения силового и локационного каналов.

4. Обоснование возможности размещения МКЛЭУ на борту КА, выводимого в космос ракетой-носителем «Протон-М» (общая полезная масса  $\sim 19700$  кг).

5. Расчетная модель и результаты расчета изменения динамики и траектории полета ФКМ, движущихся по эллиптическим орбитам при воздействии на них импульсно-периодического лазерного излучения.

#### **Апробация результатов исследования**

Результаты исследований, отраженные в диссертации, в полном объеме докладывались на разных этапах работы на: Научно-практической конференции студентов и молодых ученых МАИ «Инновации в авиации и космонавтике-2010» Москва 26 - 30 апреля 2010г; II Международной Научно-практической конференции НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКОЕ ТВОРЧЕСТВО МОЛОДЕЖИ – ПУТЬ К ОБЩЕСТВУ, ОСНОВАННОМУ НА ЗНАНИЯХ. Москва, 29 июня – 2 июля 2010г; конкурсе научно-технических работ и проектов «Молодежь и будущее авиации и космонавтики» Москва 2010; 9-ой международной конференции «Авиация и космонавтика – 2010». Москва, МАИ 16-18 ноября 2010г.; Научно-практической конференции студентов и молодых ученых МАИ «Инновации в авиации и космонавтике-2011». Москва 26 - 30 апреля 2011г.; III Международной научно-практической конференции НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКОЕ ТВОРЧЕСТВО МОЛОДЕЖИ – ПУТЬ К ОБЩЕСТВУ, ОСНОВАННОМУ НА ЗНАНИЯХ. Москва, 28 июня – 1 июля 2011г.; 10-ой международной конференции «Авиация и космонавтика – 2011». Москва, МАИ 8-10 ноября 2011г.; 13-ой международной конференции «Авиация и космонавтика – 2013». Москва, МАИ 12-15 ноября 2013г.

#### **Структура и объём диссертации**

Диссертация состоит из введения, обзора литературы, 4 глав и заключения. Общий объём диссертации - 191 страница, работа содержит 25 таблиц, 48 рисунков и список литературы из 109 наименований.

### **СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ**

Во **введении** обосновывается актуальность темы диссертации, сформулированы цели работы, приведено краткое содержание глав диссертации. Дан **краткий обзор литературы**, в которой с различной степенью детализации описываются составные части, параметры и возможные цели применения космических лазерных установок на основе автономных фтороводородных НХЛ и других мощных лазерах, разрабатываемых в России и за рубежом. Также приведён отдельный обзор работ по вопросам борьбы с ФКМ и работ по получению импульсно-периодического режима генерации в HF-НХЛ.

**Глава 1** посвящена разработке оптической схемы МКЛЭУ для получения параметров излучения, требования к которому обоснованы в [1] и главе 4, исходя из выполняемых МКЛЭУ задач.

Для выполнения названных выше жестких требований к параметрам импульсно-периодического излучения для защиты КА от ФКМ обосновано использование схемы ЗГ-ОУМ, где зарождающиеся в ЗГ импульсы будут обладать требуемыми временными характеристиками, а затем усиливаться до нужных уровней мощности в ОУМ. Однако, поскольку активная среда НХЛ существенно отличается по своим физическим свойствам от активных сред других лазеров, ранее использовавшихся для получения коротких импульсов излучения, существует ряд особенностей и ограничений как в получении коротких импульсов в средах НХЛ, так и в расчете усиления в них. Эти особенности и рассматриваются подробно в данной главе.

При обосновании параметров резонатора ЗГ нужно исходить из необходимости выполнения 3-х требований, предъявляемых к нему:

1) обеспечение формирования коротких импульсов излучения с длительностью 10 нс;

2) выполнение условия невозможности возникновения генерации в промежутках времени между соседними импульсами, когда усилительные свойства активной среды в ЗГ восстанавливаются до первоначального уровня перед воздействием следующего импульса излучения;

3) энергия импульса генерируемого излучения на выходе ЗГ должна быть максимальной для обеспечения эффективного извлечения энергии из активной среды ОУМ.

4) резонатор ЗГ должен обеспечивать генерацию излучения с угловой расходимостью, близкой к дифракционному пределу.

С учетом вышеперечисленных требований разработана оптическая схема ЗГ, обеспечивающая получение коротких импульсов в НХЛ, и произведен расчет всех её основных составляющих элементов. На эту схему автором получен патент на изобретение (РФ №2494510 от 27.09.2013г).

Рассмотрим по очереди, к чему приводит выполнение выше поставленных требований:

1. Формирование коротких импульсов в ЗГ осуществляется путем модуляции добротности его резонатора с помощью электрооптического затвора Поккельса. При его включении проход для излучения из активной среды лазера к глухому зеркалу резонатора бу-

дет открыт, и в резонаторе начнет формироваться короткий импульс излучения с длительностью, определяемой временем жизни фотонов в резонаторе  $\tau_{\phi}$ . Если в резонатор ЗГ будут помещены два внутренних затвора (один перед глухим, второй перед выходным зеркалом), то длина базы резонатора с двумя внутренними затворами составит  $L_p^{\text{реал}}(2 \text{ з}) = 260 \text{ см}$ .

2. Для выполнения второго требования необходимо, чтобы в промежутках между импульсами излучения было выполнено условие  $\alpha_0^{\text{макс}} = 0,06 \text{ см}^{-1} < \alpha_{\text{пор}}^{\text{зак}}$ , где  $\alpha_0^{\text{макс}}$  - максимальное значение коэффициента усиления в активной среде ЗГ,  $\alpha_{\text{пор}}^{\text{зак}}$  - пороговый коэффициент усиления для резонатора с закрытым электрооптическим затвором. Повышение порога генерации в промежутках между импульсами обусловлено тем, что электрооптический затвор при его размещении внутри резонатора, например, перед глухим зеркалом (рисунок 2), вносит существенные дополнительные потери, поскольку в закрытом состоянии он имеет крайне низкое пропускание падающего на него излучения ( $\sim 10^{-3}$ ). В этом случае зеркальное отражение в резонаторе ЗГ со стороны глухого зеркала будет определяться не самим зеркалом ( $R_2=1$ ), а отражением от торцов оптических элементов электрооптического затвора. Оценки показывают, что при достижимом в оптике коэффициенте отражения затворов Поккельса, когда их грани могут быть наклонены по отношению к оптической оси под углом Брюстера,  $R_{\text{затв}} = 0,5\%$  максимально допустимая длина активной среды будет довольно большой:  $L_a^{\text{ЗГ}} \leq 80 \text{ см}$ .

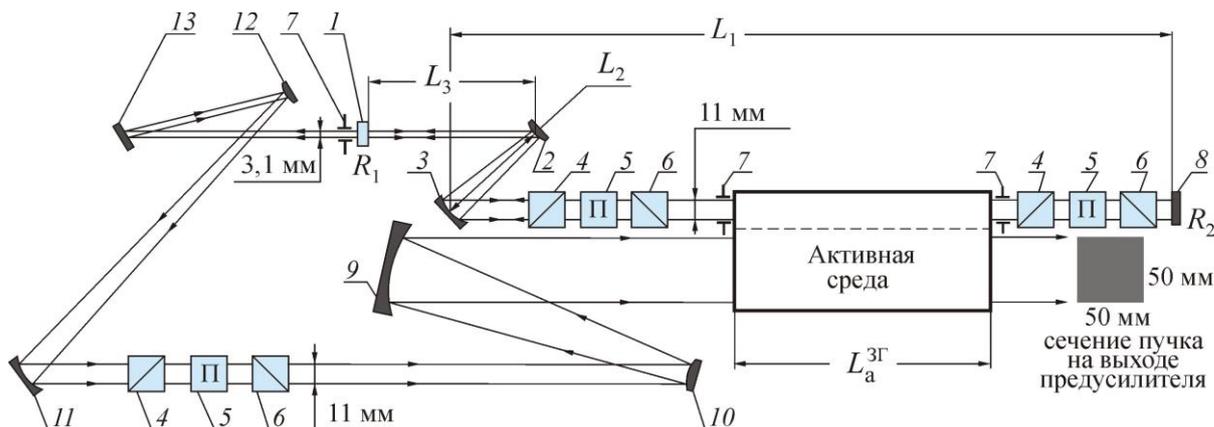


Рисунок 2 – Оптическая схема ЗГ с устойчивым однопроходным плоским резонатором (ПР): 1 – выходное зеркало ПР ( $R_1=0,1$ ); 2, 3 – сферические зеркала телескопа сжатия пучка; 4, 6 – поляризационные призмы; 5 – ячейки Поккельса CdTe; 7 – диафрагмы; 8 – глухое зеркало ПР

( $R_2=1$ );  $I3$  – плоское зеркало.

3. В американской экспериментальной работе получено значение средней мощности излучения, которое может выдержать кристалл CdTe, 79 Вт. Применительно к оптической схеме резонатора ЗГ совместно с ПУМ, представленной на рисунке 2, это будет соответствовать максимально допустимой средней мощности на наиболее нагруженном обращенным к активной среде торце затвора, размещенного внутри резонатора со стороны выходного зеркала с  $R_1=0,1$ , определяемой суммарной мощностью обеих волн на одном торце кристалла. Решение задачи по определению выходной средней мощности ЗГ при этих условиях дает величину  $\bar{P}_{\text{вых}}^{\text{ЗГ}}=41$  Вт, а длина активной среды ЗГ  $L_a^{\text{ЗГ}}$  в данном случае составляет 80 см.

4. Чтобы в ПР в результате модовой селекции генерация возникла только на основной моде, нужно, чтобы число Френеля  $N_\phi$  лишь незначительно превышало единицу. Примем его значение равным  $N_\phi=1,7$ . Тогда при поперечном размере кристалла CdTe  $d_0=1,1$  см найдем необходимую длину базы плоского резонатора (ПР)  $L_p^{\text{эфф}} = d_0^2 / (4\lambda N_\phi) \geq 636$  см, которая намного превышает величину  $L_p^{\text{реал}} (2 \text{ з}) \leq 260$  см, требующую для обеспечения необходимо малого времени жизни фотона в резонаторе ( $\tau_\phi \approx 4 \cdot 10^{-9}$  с). Выход из этого противоречия состоит в применении ПР, имеющего небольшую реальную длину базы. В таком ПР наличие участка с малым сечением пучка приводит к резкому возрастанию эффективной длины резонатора  $L_p^{\text{эфф}}$  и соответственно к значительному снижению эффективного числа Френеля  $N_{\text{эфф}}$ . Для вычисления длины такого участка разделим базу резонатора  $L_p^{\text{реал}} (2 \text{ з})$  по длине на 3 участка, расчеты длин которых дают значения:  $L_1=130$  см (участок несжатого пучка),  $L_2=10$  см (участок сжатия пучка),  $L_3=120$  см (участок сжатого пучка) (рисунок 2).

После ЗГ весьма обоснованным для обеспечения достаточного уровня насыщения активной среды в усилительных каскадах помимо ОУМ НФ-излучения является предложение использовать также и двухпроходовой ПУМ с длиной одного прохода 40 см и апертурой 5 см x 5 см, имеющий общий с ЗГ ГАС (рисунок 2). Тогда на его выходе  $E_{\text{вых}}^{\text{пред}}(1-0)=5,1 \cdot 10^{-4}$  Дж/см<sup>2</sup>,  $E_{\text{вых}}^{\text{пред}}(2-1)=1,4 \cdot 10^{-4}$  Дж/см<sup>2</sup>. Принято, что полная энергия импульсов излучения в каждой колебательной полосе будет в 6 раз больше в соответствии с числом генерирующих колебательно-вращательных переходов (с  $j=3 \dots 8$ ). Расчет

показал, что плотность энергии импульса излучения в колебательной полосе  $\nu=1 \rightarrow 0$  на входе ОУМ в  $\sim 2,5$  раза превосходит плотность энергии насыщения, а в полосе  $\nu=2 \rightarrow 1$  – в 1,5 раза. Следовательно, предложение использовать ПУМ вполне себя оправдывает, поскольку ОУМ практически с самого его входа будет работать в режиме насыщения, что приведет к более рациональному использованию компонентов лазерного топлива.

В ОУМ предполагается использовать два последовательно расположенных модуля ГАС с апертурой активной зоны  $(20 \times 5) \text{ см}^2$ , которая в 4 раза больше, чем в ПУМ (рисунок 3). В качестве прототипа ГАС ОУМ взят ГАС типа Н00, разработанный в НПО «Энергомаш» с размерами апертуры  $(5 \times 40) \text{ см}^2$  и длиной активной среды вдоль оптической оси, равной  $L_a^{yc} = 135 \text{ см}$ . Для компенсации тяги выхлопного потока целесообразно ГАС ОУМ разбить по высоте на две части и расположить каждую часть симметрично относительно центральной оси КА около его оболочки, чтобы обеспечить выхлоп отработанных газов ГАС непосредственно в окружающее пространство без использования сверхзвуковых диффузоров, как было предложено в работе [2].

Прежде чем проводить расчеты ОУМ в оптической схеме силового канала МКЛЭУ, нужно определить предельную длину активной среды этого усилителя. Ведь при усилении коротких импульсов излучения в активной среде НФ-НХЛ мы сталкиваемся с ключевой для энергетики такого усилителя проблемой, ограничивающей энергию импульсов и отсутствующей при непрерывном режиме генерации. Она заключается в возможности возникновения мощного усиленного спонтанного излучения в момент времени между короткими импульсами, когда, как было отмечено выше, усилительные свойства активной среды НФ-НХЛ восстанавливаются к приходу следующего импульса излучения. Из решения задачи по зарождению и усилению спонтанного излучения (УСИ) с учетом распространения прямой и обратной волны в ПУМ-ОУМ с максимальным значением коэффициента усиления слабого сигнала  $\alpha_0^{\text{макс}} = 0,06 \text{ см}^{-1}$ , получено, что потери запасенной в активной среде удельной энергии за счет наличия УСИ не превышают 10% при выбранной длине активной среды в усилителе  $L_a^{yc} = 340 \text{ см}$ . Тогда длина активной среды ОУМ составит величину  $L_a^{\text{ок. yc}} = L_a^{yc} - L_a^{\text{пред}} = 260 \text{ см}$ .

Для уменьшения влияния aberrаций целесообразно предусмотреть использование в оптической схеме пространственных фильтров (зеркала 1, 3 и 7, 8). Оценка полной энергии импульса НФ-излучения на выходе ОУМ дает величину  $W_{\text{имп}}^{\text{вых}} \approx 1 \text{ Дж}$ , что удовле-

творяет требованиям к энергии импульса излучения для воздействия на опасные ФКМ [1].

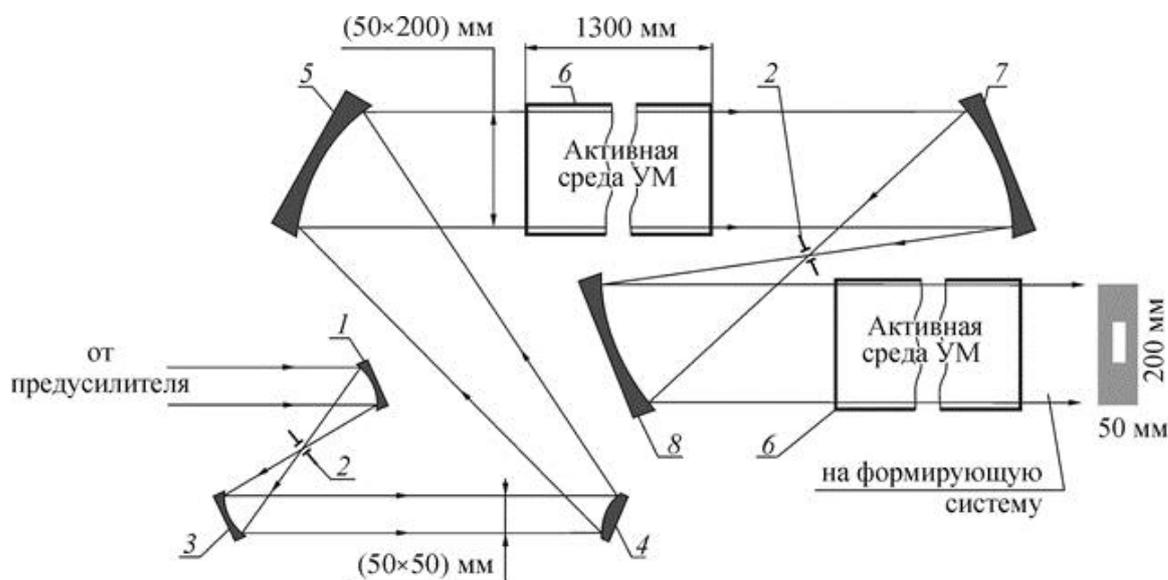


Рисунок 3 – Оптическая схема однопроходового ОУМ на основе двух последовательно расположенных плоскоблочных ГАС (однопроходовых усилителей мощности): 1, 3, 7, 8 – сферические зеркала пространственных фильтров; 2 – диафрагмы; 4, 5 – зеркала цилиндрического расширяющего телескопа; 6 – ГАС двух блоков однопроходового усилителя.

Перейдем к рассмотрению импульсно-периодического DF-излучения МКЛЭУ, которое необходимо для анализа содержания углеводородов в атмосфере. Из постановки задачи по мониторингу следует, что для определения энергии импульсов генерации в ЗГ на основе DF-НХЛ нужно определить мощность излучения только в отдельных выбранных колебательно-вращательных линиях. Необходимо рассмотреть каскадные переходы не между всеми колебательно-вращательными переходами в двух колебательных полосах молекулы HF  $\nu=2 \rightarrow 1$  и  $\nu=1 \rightarrow 0$  (как было сделано ранее для HF-излучения), а только между конкретными колебательно-вращательными переходами в трех колебательных полосах молекулы DF:  $\nu=3 \rightarrow 2$ ,  $\nu=2 \rightarrow 1$  и  $\nu=1 \rightarrow 0$ . Таким образом, в каскаде при генерации на колебательно-вращательном переходе  $P_1(9)$  будут рассмотрены участвующие два перехода  $P_2(8)$  и  $P_3(7)$ , а в каскаде с переходом  $P_2(6)$  будут рассмотрены участвующие переходы  $P_3(7)$  и  $P_1(5)$ .

Расчеты для перехода  $P_1(5)$  дали энергию импульса излучения на выходе ЗГ, равную  $W_{\text{ВЫХ}}^{\text{ЗГ}}(P_1(5)) = 2,7 \cdot 10^{-4}$  Дж, а на выходе ПУМ –  $W_{\text{ВЫХ}}^{\text{пред}}(P_1(5)) = 5,4$  мДж. Примерно такая

же энергия импульса будет на переходе  $P_1(6)$ . Для перехода  $P_1(9)$   $W_{\text{вых}}^{\text{ЗГ}}(P_1(9)) = 1,3 \cdot 10^4$  Дж, а  $W_{\text{вых}}^{\text{пред}}(P_1(9)) = 1,8$  мДж. Для второй линии –  $P_2(6)$ , энергия импульса излучения достигнет 7 мДж. Таким образом, для решения задач обнаружения надфоновых концентраций метана в приземной атмосфере с помощью DF-излучения достаточно использовать только ЗГ-ПУМ (рисунок 2). Необходимости в применении ОУМ нет. Причем следует подчеркнуть, что оптическая схема ЗГ с ПУМ остается без изменений при переходе от ГАС HF-НХЛ к ГАС DF-НХЛ. Отпадает только необходимость в использовании внешнего электрооптического затвора.

Для подпитки энергией действующих КА требуется непрерывное HF-излучение. Расчет ЗГ, представленного на рисунке 2, работающего в непрерывном режиме, был произведен по программе, основанной на системе уравнений Навье-Стокса в приближении узкого канала. Рассчитанная приведенная мощность, получаемая в ЗГ, составила 36 Вт/см<sup>2</sup>. Расчет усиления этой мощности в ПУМ дает значение на его выходе 5,3 кВт.

В главе 2 выполнена разработка оптической схемы формирующей и информационно-прицельной систем (ФИПС) для обнаружения, сопровождения ФКМ и наведения на них силового лазерного излучения, а также наведения излучения на приемные устройства подпитываемых спутников и выполнения задачи мониторинга атмосферы.

Определены требования к излучению локационного ИАГ:Nd-лазера, работающего на удвоенной частоте ( $\lambda=0,53$  мкм): энергия в импульсе 0,34 Дж, длительность импульсов  $\sim 20$  нс, частота их повторения 1,9 кГц. Расчеты показывают, что при накачке лазерного локатора полупроводниковыми светодиодами (КПД  $\sim 50 - 70$  %) потребляемая им мощность составит 1,3 кВт.

Оптическая схема совмещения локационного и силового каналов излучения изображена на рисунке 4, где в качестве приемного локационного телескопа предложено использовать выходной формирующий силовой телескоп схемы Кассегрена с асферическими зеркалами (8 и 9) с диаметром главного зеркала 1 м и базой  $L_1=2$  м. Оценки массы телескопа дали величину  $\sim 700$  кг при объеме  $\sim 4,5$  м<sup>3</sup>, что вполне позволяет разместить его на КА. Элементы 21, 24, 19, 20 составляют оптико-механический тракт (ОМТ) передающего канала лазерного локатора. Элементы 9, 8, 7, 6, 5, 4, 3, 2, 10, 15, 27, 28, 24, 25, 26 составляют ОМТ дальномера. Элементы 9, 8, 7, 6, 5, 4, 3, 2, 10, 15, 19, 16, 17 составляют ОМТ приемного информационного канала лазерного локатора.

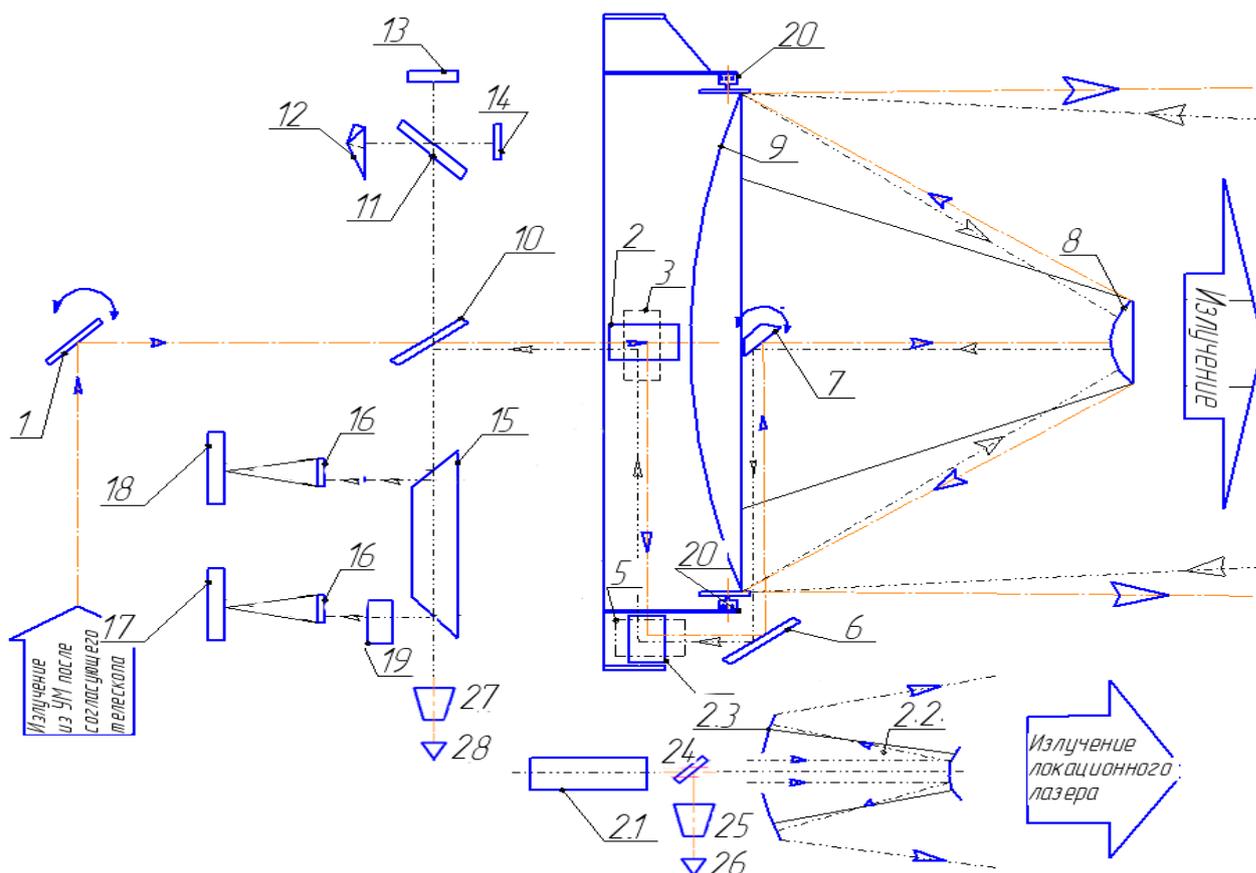


Рисунок 4 – Принципиальная оптическая схема ФИПС.

В главе 3 произведена оценка массогабаритных характеристик остальных подсистем МКЛЭУ, разработана общая компоновочная схема МКЛЭУ на борту КА.

Основные параметры КА для размещения на его борту МКЛЭУ во многом определяются решаемыми установкой задачами, определенными во введении. Максимально допустимая масса КА при выводе на круговую орбиту ИСЗ высотой 350 км с наклоном  $51,6^\circ$  ракетой-носителем "Протон-М" с космодрома Байконур составляет 19700 кг. Оцененная массы собственных систем КА составила ~ **6000** кг. Массовая сводка по системам МКЛЭУ представлена в таблице 1.

Таблица 1 – Массовая сводка по системам МКЛЭУ

Системы МКЛЭУ	Масса, кг	
Система генерации излучения	1310	13688
Система подачи компонентов лазерного топлива (СПКЛТ)	420	
Формирующая оптическая система	660	
Система лазерной локации	240	
Система хранения лазерного топлива	6670	
Компоненты лазерного топлива (КЛТ)	4388	
Всего с массой собственных систем КА:		19646

Общий вид МКЛЭУ на борту КА показан на рисунке 5.

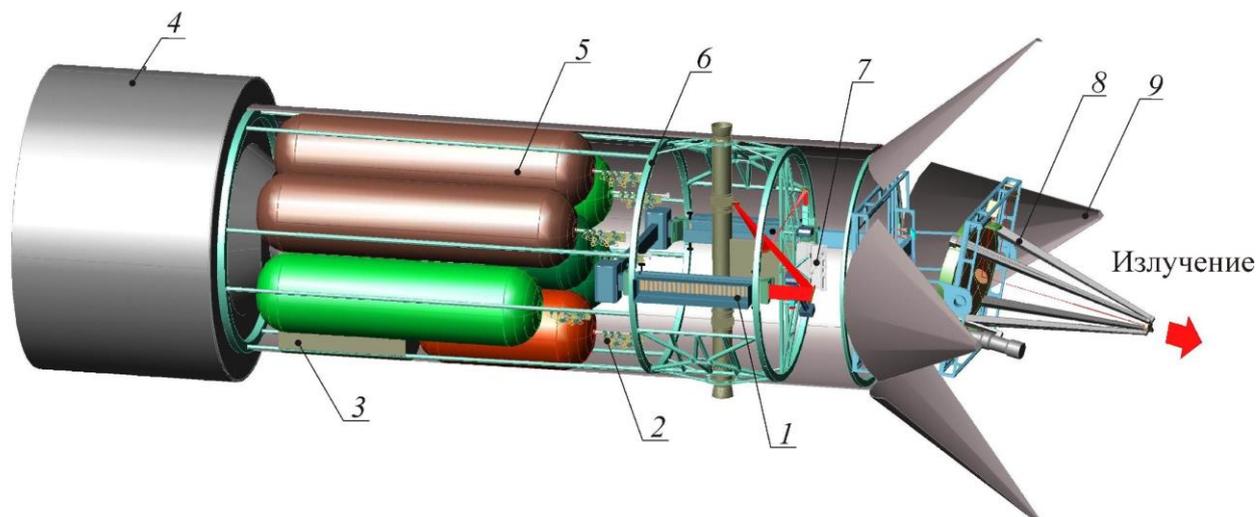


Рисунок 5 – Общий вид МКЛЭУ на борту КА: 1 – модуль ОУМ; 2 – СПКЛТ; 3 – отсек криогенных холодильных машин; 4 – функционально-служебный модуль ракеты-носителя; 5 – баки КЛТ; 6 – силовая рама газодинамического; 7 – ЗГ с ПУМ; 8 – телескоп ФИПС; 9 – элемент защитного кожуха телескопа ФИПС.

КА с МКЛЭУ может быть размещен под стандартным обтекателем ракеты-носителя "Протон-М" ( $\varnothing 4,15 \text{ м} \times 15,5 \text{ м}$ ). Головная часть защитного кожуха КА при старте находится в сложенном состоянии, предохраняя формирующий телескоп.

Оценки общей продолжительности работы МКЛЭУ дают значение 30 минут при необходимом времени воздействия на ФКМ  $\sim 1,5 \text{ с}$  в режиме импульсно-периодического излучения на молекулах HF с энергией в импульсе 1 Дж или 180 минут в импульсно-периодическом режиме излучения на молекулах DF с энергией в импульсе на нужных колебательно-вращательных переходах  $\sim 5 \text{ мДж}$ . Продолжительность HF излучения в непрерывном режиме с мощностью  $\sim 5 \text{ кВт}$  для подпитки энергией действующих КА составляет 280 минут. При необходимости МКЛЭУ может быть дозаправлена с помощью грузового корабля с запасом компонентов лазерного топлива. В этом случае общая продолжительность работы МКЛЭУ в режиме излучения значительно возрастет.

В главе 4 обоснована возможность применения излучения разрабатываемой МКЛЭУ для защиты КА и очистка околоземного пространства от опасных ФКМ, экологического контроля (мониторинга) приземной атмосферы из космоса и возможность подзарядки АКБ других КА с целью продления срока их функционирования.

При решении задачи защиты КА от опасных металлических и неметаллических ФКМ размером от 1 до 10 см рассматривались круговые орбиты КА с высотами 400 км

(характерно для МКС), 700 км и 1000 км (спутники связи, исследовательские и метеорологические) и эллиптические орбиты ФКМ в двух случаях: когда угол между их орбитами  $\varphi=0^\circ$  (компланарные орбиты) и случай, когда  $\varphi \gg 0^\circ$ . Проанализированы возможные варианты сближения и столкновения КА с опасными ФКМ, рассчитаны при этом столкновительные параметры (точки пересечения траекторий, относительная скорость в них, параметры орбиты ФКМ), произведен расчет воздействия импульсно-периодического излучения МКЛЭУ на динамику полета ФКМ. Для этого разработан численный алгоритм и создана программа расчета воздействия импульсно-периодического лазерного излучения на динамику сближения ФКМ с КА (свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2012616468 от 18.07.2012 г.), дающая возможность варьировать ряд основных исходных параметров: начальные и конечные расстояния воздействия, материал (металл – неметалл), размер и массу ФКМ. На основании этих входных данных произведен расчет влияния каждого единичного импульса излучения суммарное влияние на изменение скорости ФКМ и параметров его орбиты, а, соответственно, и на изменение траектории полета ФКМ, и величину отклонения ФКМ от защищаемого КА. Дополнительно на каждом шаге вычисляется часть испаряющейся массы ФКМ за импульс, и оставшаяся масса ФКМ. При проведении расчетов были приняты следующие параметры МКЛЭУ [1]: энергия импульса выходного НФ-излучения  $E \approx 1$  Дж, диаметр выходного телескопа 1 м, расходимость излучения равна двум дифракционным пределам, длительность импульса – 10 нс, частота повторения импульсов –  $10^5$  Гц.

В итоге, проведенные расчеты для случая компланарных орбит показали, что даже при самом неблагоприятном случае сближения, когда ФКМ догоняет КА с относительной скоростью сближения в предполагаемой точке столкновения из рассматриваемых нами случаев максимальна и составляет  $\sim 395$  м/с (КА движется по круговой орбите с высотой 400 км, перигей/апогей эллиптической орбиты ФКМ 400 км/ 2000 км, тип ФКМ – металл размером 4 см) при воздействии излучения МКЛЭУ на ФКМ длительностью 1,5 с с расстояния 1,7 км удастся снизить скорость сближения на величину  $\Delta V=15$  м/с. При этом величина отклонения ФКМ от предполагаемой точки столкновения  $\Delta H$  составит 313 м. Если продолжать воздействие излучения на ФКМ в течение 4 с, то величина  $\Delta V$  составит 286 м/с, а  $\Delta H$  – 1900 м. Помимо этого, в данном случае будет испарена часть ФКМ массой 13,2 г. Полученные результаты подтверждают возможность уверенной за-

щиты КА от опасных ФКМ при выбранных выше параметрах излучения МКЛЭУ. Для увеличения эффективного расстояния воздействия на ФКМ предлагается использовать промежуточное передающее зеркало, расположенное на значительном расстоянии от МКЛЭУ (10-20 км).

Аналогичные расчеты для случая пересечения орбит ФКМ и КА под углами  $\varphi \gg 0$  показали, что данный случай защиты КА от ФКМ является менее благоприятным из-за того, что вектор изменения скорости ФКМ, возникающий за счет импульса отдачи при воздействии импульсов лазерного излучения на поверхность ФКМ, не лежит в плоскости орбиты ФКМ. В данном случае для отклонения ФКМ от КА на величины  $\Delta H = 400$  м требуется более длительное время воздействия  $\sim 2,5$  с.

Если импульсно-периодическое излучение HF-NХЛ предполагается использовать в МКЛЭУ для защиты КА и очистки космических орбит от опасных ФКМ, то импульсно-периодическое излучение DF-NХЛ предполагается применить в МКЛЭУ для анализа содержания углеводородов в атмосфере, для чего требуется генерировать излучение на конкретных колебательно-вращательных переходах. При использовании метода дифференциального поглощения излучения на двух линиях молекулы DF  $P_1(9)+P_2(6)$  соответственно в качестве аналитической и опорной волн достаточно энергии импульса  $\sim 5$  мДж при длительности импульсов  $\sim 10$  нс, чтобы зарегистрировать надфоновую концентрацию метана в приземной атмосфере из космоса. При использовании ретрорефлектора энергия импульса излучения на рассматриваемых двух линиях снижается до  $\sim 1$  мДж.

Для подпитки действующих КА энергией от МКЛЭУ обосновано применение непрерывного HF-излучения с мощностью  $\sim 5$  кВт. При этом на подпитываемом КА дополнительно должен быть размещен приемник излучения «наноантенна» размером 1,5 м x 1,5 м, экспериментальное производство которого уже начато в Америке. Энергию для функционирования спутники получают с помощью солнечных батарей. Эта энергия идет на текущее потребление различной аппаратурой и зарядку АКБ. Однако, имеется 2 периода в году вблизи осеннего и весеннего равноденствия (примерно по месяцу каждый), когда спутники попадают в тень Земли; при этом максимальное затенение для орбиты высотой 400 км длится около 37 минут. Хотя сама по себе доля недополученной спутниками энергии невелика, но во время затенения АКБ разряжаются, и срок службы их сокращается, понижая тем самым и срок службы самого спутника. Расчеты показывают, что при длительности подпитки КА, находящегося на орбите, отличающейся от

орбиты МКЛЭУ на 100 км, ~ 30 минут один раз в полгода можно снизить массу КА за счет уменьшения массы АКБ со временем жизни на орбите около 5 лет на ~ 230 кг, что в свою очередь уменьшит стоимость запуска такого КА на орбиту на ~ 690000 \$. При подпитке КА со временем жизни на той же орбите ~ 5 месяцев, уменьшение массы может составить ~90 кг, а уменьшение затрат на запуск – 230000 \$.

### **Основные результаты работы**

1. Разработана оптическая система формирования мощной импульсно-периодической генерации излучения в HF(DF)-НХЛ. Нетривиальность решаемой задачи заключалась в отыскании условий эффективного формирования импульсно-периодического лазерного силового излучения при непрерывном механизме накачки, присущем таким лазерам, когда в ЗГ существует опасность возникновения УСИ. Обосновано применение в ней системы ЗГ-ПУМ-ОУМ. Сформулированы параметры излучения ЗГ. Обосновано применение внутри ЗГ двух электрооптических затворов CdTe для модуляции добротности ПР и для повышения порога возникновения генерации в промежутках между импульсами. Найдена предельно-допустимая длина активной среды в ЗГ (80 см).

2. Обосновано для обеспечения достаточного уровня насыщения активной среды в усилительных каскадах помимо ОУМ HF-излучения применение после ЗГ двухпроходо-вого ПУМ с длиной одного прохода 40 см и апертурой 5 см x 5 см, имеющий общий с ЗГ ГАС.

3. Расчеты для DF-излучения показали, что на выходе блока ЗГ-ПУМ можно получить необходимую для осуществления мониторинга атмосферы энергию импульсов ~5 мДж на нужных колебательно-вращательных переходах. ОУМ в данном случае не используется.

4. Расчет параметров непрерывного HF-излучения при использовании только ЗГ-ПУМ показал, что на выходе такой системы достигается требуемая для подпитки КА мощность излучения ~ 5 кВт. При этом потребность в ОУМ в данном случае также отсутствует.

5. Оценена предельная длина активной среды в ОУМ, обусловленная возникновением вредного мощного УСИ в момент времени между соседними импульсами излучения, когда усилительные свойства активной среды в HF-усилителе восстанавливаются до прежнего уровня, что может привести к существенному снижению запасенной в активной среде HF-усилителя энергии ко времени прихода очередного импульса излучения на

вход усилительных каскадов. При допустимых потерях запасенной в активной среде энергии не более 10% и при среднем коэффициенте усиления  $0,06 \text{ см}^{-1}$  общая длина активной среды в усилительных каскадах не должна превышать 340 см. Таким образом, длина активной среды в ОУМ за вычетом длины активной среды в ПУМ не должна превышать 260 см. В качестве прототипа ГАС ОУМ взят ГАС типа Н00, разработанный в НПО «Энергомаш» с размерами аппретуры  $(5 \times 40) \text{ см}^2$  и длиной активной среды вдоль оптической оси, равной  $L_a^{yc} = 135 \text{ см}$ . На выходе такого ОУМ достижима полная энергию импульса НФ-излучения  $\sim 1 \text{ Дж}$  с длительностью 10 нс и частотой повторения  $10^5 \text{ Гц}$ .

6. Разработана формирующая и информационно-прицельная системы с выходным телескопом силового канала излучения, выполненным по схеме Кассегрена с асферическими зеркалами, базой 2 м и диаметром большого зеркала 1 м. В качестве приемного локационного телескопа предложено использовать выходной силовой телескоп. Показана возможность уверенного обнаружения налетающих на КА в диапазоне углов  $\pm 7,5^\circ$  опасных ФКМ размером от 1 см до 10 см на расстоянии 20 км по солнечному отраженному излучению, когда ФКМ освещен Солнцем, и по отраженному излучению лазерного локатора, когда ФКМ находится в тени. Определены требования к излучению локационного ИАГ:Nd-лазера. Разработана схема совмещения локационного и силового каналов излучения.

7. Произведена оценка массогабаритных характеристик и выполнена компоновка на КА составных частей МКЛЭУ: системы генерации излучения, хранения и подачи компонентов лазерного топлива (СХПК), формирующей оптической системы и системы лазерной локации. Обоснована возможность размещения МКЛЭУ на борту КА с общей массой  $\sim 19700 \text{ кг}$ . Такой КА может быть размещен под "стандартным" обтекателем ракеты-носителя "Протон-М", что позволяет вывести его на круговую орбиту ИСЗ высотой 350 км с наклоном  $51,6^\circ$ .

8. Выполнены оценки общей продолжительности работы МКЛЭУ при одной заправке СХПК, которые составляют 30 минут в режиме импульсно-периодического НФ-излучения с энергией импульса  $\sim 1 \text{ Дж}$  для защиты КА от ФКМ и очистки околоземного пространства, или 180 минут в режиме импульсно-периодического DF-излучения с энергией в импульсе на нужных колебательно-вращательных переходах  $\sim 5 \text{ мДж}$ , необходимой для мониторинга атмосферы, или 280 минут в непрерывном режиме НФ-излучения с мощностью  $\sim 5 \text{ кВт}$  при подпитки энергией действующих КА. При необхо-

димости МКЛЭУ может быть дозаврвлена с помощью грузового корабля с запасом компонентов лазерного топлива.

9. Показано, что при защите КА от опасных ФКМ или очистке околоземного пространства от ФКМ размером от 1 см до 10 см с помощью МКЛЭУ (импульсно-периодический режимом НФ-излучения с длительностью импульсов  $\sim 10$  нс и частотой повторения  $10^5$  Гц и энергией в импульсе  $\sim 1$  Дж) избежать столкновения можно во всех рассмотренных опасных случаях сближения ФКМ с КА. При этом для металлических частиц эффективное изменение динамики ФКМ начинается с расстояния воздействия излучения МКЛЭУ  $\sim 2$  км, а для неметаллических -  $\sim 3,5$  км. Необходимая для защиты КА длительность воздействия лазерным излучением не превышает 1,5 с.

10. Обосновано для мониторинга приземной атмосферы с помощью МКЛЭУ использование импульсно-периодический режим DF-излучения с длительностью импульса 10 нс и энергией  $\sim 5$  мДж на двух линиях молекулы DF P1(9)+P2(6) соответственно.

11. Показано, что при длительности подпитки КА непрерывным НФ-излучением МКЛЭУ с мощностью  $\sim 5$  кВт, находящегося на орбите, отличающейся от орбиты КА на 100 км,  $\sim 30$  минут один раз в полгода можно снизить массу КА за счет уменьшения массы АКБ с временем жизни на орбите около 5 лет на  $\sim 230$  кг, что в свою очередь уменьшит стоимость запуска такого КА на орбиту на  $\sim 690000$  \$. При подпитке КА с временем действия на той же орбите  $\sim 5$  месяцев, уменьшение массы может составить  $\sim 90$  кг, а уменьшение затрат на запуск – 230000 \$.

### **Список публикаций соискателя по теме диссертации**

#### **I. Научные труды, опубликованные в ведущих рецензируемых научных изданиях, рекомендованных ВАК Минобрнауки России:**

1. Авдеев А.В., Башкин А.С., Каторгин Б.И., Парфеньев М.В. Анализ возможности очистки околоземного пространства от опасных фрагментов космического мусора с помощью космической лазерной установки на основе автономного непрерывного химического НФ-лазера // Квантовая электроника, 2011, 41 (7), С. 669–674.
2. Авдеев А.В., Башкин А.С., Курдюков М.В., Парфеньев М.В., Семенов С.Н. О выхлопных устройствах фтороводородных космических лазерных установок // Труды НПО «Энергомаш им. Академика В.П. Глушко», 2011, том 28, С. 318-330.
3. Авдеев А.В., Башкин А.С., Шушарин Е.И. Анализ параметров космической лазерной установки на основе НФ-НХЛ для очистки околоземного пространства // Труды НПО «Энергомаш им. Академика В.П. Глушко» 2010, том 27, С. 284-304.

4. Avdeev A.V., Bashkin A.S., Katorgin B.I., Parfen'ev M.V. About possibilities of clearing near-earth space from dangerous debris by a spaceborne laser system with an autonomous cw chemical hf laser // Quantum Electronics. 2011. 41 (7). P. 669-674.

5. Авдеев А.В. Требования к параметрам космической лазерной установки на основе HF-НХЛ для очистки околоземного пространства от опасных фрагментов космического мусора // “Электронный журнал «Труды МАИ», 2011, выпуск № 45:

<http://www.mai.ru/science/trudy/published.php?ID=25331> (дата публикации 09.06.2011).

6. Авдеев А.В. Особенности получения и усиления коротких импульсов излучения в активных средах HF-НХЛ // Электронный журнал «Труды МАИ», 2012, выпуск № 52: <http://www.mai.ru/science/trudy/published.php?ID=29454> (дата публикации 05.04.2012).

7. Авдеев А.В. К вопросу борьбы с космическим мусором с помощью лазерной космической установки на основе HF-НХЛ // Электронный журнал «Труды МАИ», 2012, выпуск № 61: <http://www.mai.ru/science/trudy/published.php?ID=35496> (дата публикации 24.12.2012).

8. Авдеев А.В., Башкин А.С., Каторгин Б.И., Парфеньев М.В., Семенов С.Н. Компоновка многоцелевой лазерной космической установки на основе HF(DF)-НХЛ на борту КА // Электронный журнал «Труды МАИ», 2013 г., выпуск № 71:

<http://www.mai.ru/science/trudy/published.php?ID=46728> (дата публикации 26.12.2013).

## **II. Другие научные труды, опубликованные по теме диссертации не включая тезисы конференций:**

9. Авдеев А.В. Космическая лазерная установка для защиты КА от космического мусора. LAP LAMBERT Academic Publishing, 2011. 108с.

10. Авдеев А.В. Теоретические основы создания многоцелевой космической лазерной установки на основе фтороводородных непрерывных химических лазеров (НХЛ). LAP LAMBERT Academic Publishing, 2013. 228с.

11. Авдеев А.В., Башкин А.С. Химический импульсно-периодический лазер с непрерывной накачкой и модуляцией добротности резонатора. // Патент на изобретение. Патент на изобретение РФ № 2494510 от 27.09.2013 г.

12. Авдеев А.В. Программа для расчета воздействия импульсно-периодического лазерного излучения космической лазерной установки на опасные фрагменты космического мусора // Программа для ЭВМ. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2012616468 от 18.07.2012 г.