**МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ**



**ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ «МОСКОВСКИЙ АВИАЦИОННЫЙ ИНСТИТУТ** (национальный исследовательский университет)»

**Институт (Филиал) №14 «Передовая инженерная школа» Кафедра 1401 \_\_\_ \_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_**

**Группа М14О-201СВ-23 Направление 24.04.04 Авиастроение \_\_\_\_\_**

**Программа\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_Электрические силовые установки\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_**

**Квалификация\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_Инженер-исследователь\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_**

**ВЫПУСКНАЯ КВАЛИФИКАЦИОННАЯ РАБОТА**

На тему:

Автор ВКР Игнатенко Валерий Константинович (\_\_\_\_\_\_\_) (фамилия, имя, отчество полностью)

Научный руководитель Старовойтов Евгений Игоревич (\_\_\_\_\_\_\_) (фамилия, имя, отчество полностью)

Консультант (\_\_\_\_\_\_\_) (фамилия, имя, отчество полностью)

Консультант (\_\_\_\_\_\_\_) (фамилия, имя, отчество полностью)

Рецензент (\_\_\_\_\_\_\_\_)

**К защите допустить**

Заведующий кафедрой 1401 Нестеров Олег Владимирович (\_\_\_\_\_\_\_\_\_) (№ каф) (фамилия, имя, отчество полностью)

\_\_\_ \_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_ 20\_\_\_ г.

Москва 2025

Аннотация работы

Тут будет очень умный сокращенный реферат по проделанной мной работе возможно даже с картинками

Оглавление

[Определения, обозначения и сокращения 5](#_Toc199414150)

[Введение 6](#_Toc199414151)

[Электромагнитная индукция 8](#_Toc199414152)

[Микроволновое излучение 10](#_Toc199414153)

[Оптоволоконная передача энергии 12](#_Toc199414154)

[Лазерный метод 15](#_Toc199414155)

[Глава 1. Анализ ключевых параметров передачи энергии 19](#_Toc199414156)

[1.1 Влияние атмосферных условий на эффективность передачи 20](#_Toc199414157)

[1.1.1. Типы взаимодействия света и среды 20](#_Toc199414158)

# Определения, обозначения и сокращения

В настоящем отчет о НИР применяют следующие термины с соответствующими определениями:

* ИК – инфракрасный, излучение с длиной волны от 0,74 мкм до 2000 мкм
* БПЛА – беспилотный летательный аппарат
* АКБ – аккумуляторная батарея
* КПД – коэффициент полезного действия
* ГА – генетический алгоритм

# Введение

В условиях ведения современных боевых действий особую популярность приобрели дроны самых разных типов конструкций и дальностей действия. Эти аппараты, благодаря своей автономности, относительной дешевизне по сравнению с танками, самолётами или легкой бронетехникой, а также высокой мобильности и незаметности, являются незаменимым инструментом для выполнения широкого спектра задач — от разведки и наблюдения до точечных ударов по технике или живой силе противника. Их использование позволяет оперативно реагировать на изменения обстановки, выполнять сложные тактические манёвры и минимизировать риски для личного состава.

Несмотря на очевидные преимущества, одной из самых серьёзных проблем остаётся обеспечение достаточной автономности полёта. Основным ограничивающим фактором является вес аккумуляторной батареи, необходимой для работы всех систем аппарата. Современные технологии хранения энергии пока не позволяют уменьшить вес батарей до оптимальных размеров, что вынуждает разработчиков идти на компромисс: либо уменьшать время работы дрона, снижая его автономность, либо сокращать массу других жизненно важных компонентов, таких как боевая часть, что негативно сказывается на общей эффективности устройства. В ответ на эту проблему некоторые исследователи предлагают кардинальные решения, предполагающие отказ от встроенных бортовых систем энергосбережения. Идея заключается в том, чтобы заменить традиционное хранение энергии на использование дистанционных станций питания, способных обеспечить непрерывное энергоснабжение без увеличения массы аппарата.

Такой подход открывает новые горизонты в эксплуатации беспилотных систем, позволяя не только компенсировать недостатки современных аккумуляторов, но и существенно расширять функциональные возможности аппарата без ущерба для летных характеристик. В этом контексте становится особенно актуальным вопрос выбора оптимальной технологии передачи энергии, которая могла бы эффективно работать в условиях динамично меняющегося поля боя. Развитие современных материалов, инновационный инженерный подход и повышение требований к системам энергоснабжения стимулируют разработку разнообразных методов, основанных на различных физических принципах.

Параллельно с поиском решений для непосредственного питания БПЛА в реальном времени, современные исследования активно изучают пути передачи энергии на расстоянии, которые могут обеспечить высокую направленность и минимизацию потерь даже при больших дистанциях. Технологии, основанные на электромагнитной индукции, СВЧ-волнах, оптоволоконной передаче или лазерном излучении, уже демонстрируют впечатляющие результаты в лабораторных условиях и постепенно переходят в область практических применений. Особое внимание уделяется лазерной передаче энергии в инфракрасном диапазоне, где минимизация угловой расходимости луча позволяет существенно снизить потери при передаче, обеспечивая при этом высокую безопасность и эффективность системы.

Эта концепция дистанционного питания имеет огромный потенциал для оптимизации работы беспилотных систем. По мере совершенствования технологий на этапах преобразования электрической энергии в лазерное излучение и обратно, становится возможным не только решить задачу снижения веса аппарата за счет отказа от громоздких аккумуляторов, но и обеспечить стабильное энергоснабжение даже в условиях интенсивного использования и сложной тактической обстановки. Таким образом, переход от традиционных систем хранения энергии к инновационным методам беспроводной передачи становится логичным продолжением эволюции БПЛА, где каждый грамм имеет значение, а эффективность энергосистем играет ключевую роль в обеспечении боевой готовности и оперативности действий.

Исходя из описанных выше проблем и перспектив, становится очевидным, что совершенствование методов передачи энергии может сыграть решающую роль в дальнейшем развитии технологий беспилотных систем. Наблюдая за ограничениями традиционных аккумуляторных систем и учитывая предложения по использованию дистанционных станций питания, мы видим необходимость детального рассмотрения современных подходов к передаче энергии. Эти подходы, базирующиеся на разнообразных физических принципах, обладают потенциалом не только компенсировать недостатки существующих решений, но и открыть новые возможности для обеспечения надежного энергоснабжения в сложных условиях боевых действий.

В свою очередь, многообразие технологий — от электромагнитной индукции и СВЧ-волн до оптоволоконной передачи и лазерного излучения — позволяет подобрать оптимальное решение с учетом конкретных эксплуатационных требований. Такое разнообразие стимулирует глубокий анализ преимуществ и ограничений каждого метода, что является необходимым этапом для создания эффективной и адаптивной системы дистанционного питания для БПЛА. Далее последует подробный обзор систем передачи энергии, в котором будут раскрыты основные физические принципы, технические характеристики и перспективы интеграции этих технологий в современные беспилотные аппараты.

## Электромагнитная индукция



Рисунок 1 – Схема передачи энергии посредством воздействия электромагнитного поля

Этот метод основан на явлении электромагнитного поля. Для передачи беспроводной энергии используется трансформатор. Благодаря явлению электромагнитной индукции, на приемной катушке устройства создается наведенный ток с передающей катушки. Для меньших потерь энергии необходимо, чтобы катушки находились рядом. Основной теоретической базой данного метода является закон Фарадея об электромагнитной индукции, который утверждает, что изменение магнитного потока через замкнутый контур индуцирует в нем электродвижущую силу. В случае системы беспроводной передачи энергии переменный ток, проходящий через передающую катушку, создает переменное магнитное поле, которое, проникая в приемную катушку, индуцирует в ней ток. Это позволяет преобразовывать электрическую энергию одного устройства в магнитное поле, а затем – обратно в электрическую энергию другого устройства.

Для обеспечения эффективной передачи энергии критически важно максимизировать коэффициент взаимной индукции между катушками. Этот коэффициент зависит от таких факторов, как расстояние между катушками, их ориентация, число витков, диаметр проводников и использование магнитных сердечников. Чем выше степень магнитного сцепления между передающей и приемной катушками, тем эффективнее происходит передача энергии, а потери снижаются.

Кроме того, значительное влияние на эффективность системы оказывает рабочая частота переменного тока. При настройке обеих катушек на одну и ту же резонансную частоту наблюдается резонансный эффект, который приводит к увеличению амплитуды переменных электрического и магнитного полей в системе. Это усиление улучшает взаимную индукцию между катушками и, как следствие, повышает энергоэффективность передачи энергии, не изменяя при этом длину волны электромагнитного поля. Такой подход позволяет улучшить параметры системы без необходимости уменьшать расстояние между компонентами.

Использование резонанса колебательного контура несколько увеличивает дальность передачи. При резонансной индукции передатчик и приёмник настроены на одну частоту. Производительность может быть улучшена ещё больше путём изменения формы волны управляющего тока от синусоидальных до несинусоидальных переходных формы волны. Импульсная передача энергии происходит в течение нескольких циклов. Таким образом, значительная мощность может быть передана между двумя взаимно настроенными LC-цепями с относительно невысоким коэффициентом связи. Передающая и приёмная катушки, как правило, представляют собой однослойные соленоиды или плоскую спираль с набором конденсаторов, которые позволяют настроить принимающий элемент на частоту передатчика.

Обычным применением резонансной электродинамической индукции является зарядка аккумуляторных батарей портативных устройств, таких, как портативные компьютеры и сотовые телефоны, медицинские имплантаты и электромобили. Техника локализованной зарядки использует выбор соответствующей передающей катушки в структуре массива многослойных обмоток. Резонанс используется как в панели беспроводной зарядки (передающем контуре), так и в модуле приёмника (встроенного в нагрузку) для обеспечения максимальной эффективности передачи энергии. Такая техника передачи подходит универсальным беспроводным зарядным панелям для подзарядки портативной электроники, такой, например, как мобильные телефоны. Техника принята в качестве части стандарта беспроводной зарядки Qi.

## Микроволновое излучение

Метод микроволнового излучения, по сравнению с методом электромагнитной индукции, позволяет в 565 раз увеличить расстояние, на которое будет передана энергия. Электромагнитные волны СВЧ-диапазона с длиной волны 12 см, что соответствует частоте 2,45 ГГц, способны проходить через земную атмосферу фактически без потерь. Для использования данного метода необходимы два устройства: Первое, магнетрон – генератор микроволнового излучения, позволяющий преобразовать электрический ток в микроволновое излучение. Второе, приемная антенна, принимающая микроволновое излучение. Вильям Броун испытал устройство, способное преобразовывать микроволны в электрический ток. Данное устройство получило название ректенна. Она состоит из полуволновых диполей, каждый из которых нагружен на высокоэффективные диоды Шоттки. Ректенны достаточно миниатюрны и имеют высокий КПД – до 95 %, однако их нагрузочная способность составляет единицы ватт. Поэтому для передачи больших мощностей из ректенн собирают большие приемные панели, рассчитанные на передачу определенной мощности. Именно с именем Вильяма Броуна и его изобретением связана самая успешная беспроводная передача энергии. В 1976 г. ему удалось передать СВЧ-пучком 30 кВт непрерывной мощности на расстояние 1,6 км с КПД, составляющим 82 %. Однако, при небольших перегрузках полупроводниковые диполи сгорают, при перегрузке на одном из полупроводников выходит из строя целая приемная панель. Ненадежность и дороговизна стали основными факторами, которые не позволили найти применения данному методу вне лабораторных испытаний. В Советском Союзе, такая антенна была названа «циклотронный преобразователь энергии». На рисунке 2 представлен циклотронный преобразователь энергии.



Рисунок 2 – Циклотронный преобразователь

Циклотронный преобразователь основан на возбуждении быстрой циклотронной волны электронного потока за счет подводимой СВЧ-энергии и последующем преобразовании этой энергии в поступательную энергию движения электронов. В его основе лежит ламповая технология и это делает его габаритным. КПД преобразования до 80 % при уровне подводимой СВЧ-мощности порядка 10 кВт, при этом допустимы значительные колебания уровня подводимой СВЧмощности. Данная характеристика позволяет преобразователю легко переносить перегрузки, он не имеет проблем переизлучения и дешевле американского аналога.

Сложностью в создании энергетического микроволнового луча является то, что для использования его в космических программах из-за дифракции, ограничивающей направленность антенны, необходима диафрагма большого размера. Например, согласно исследованию НАСА 1978 года, для микроволнового луча частотой 2,45 ГГц понадобится передающая антенна диаметром в 1 км, а приёмной ректенны диаметром в 10 км. Эти размеры могут быть снижены путём использования более коротких длин волн, однако короткие волны могут поглощаться атмосферой, а также блокироваться дождём или каплями воды. Из-за «проклятия узкого пучка» невозможно сузить луч, объединяя пучки от нескольких меньших спутников без пропорциональной потери в мощности. Для применения на земле антенна диаметром 10 км позволит достичь значительного уровня мощности при сохранении низкой плотности пучка, что важно по соображениям безопасности для человека и окружающей среды. Безопасный для человека уровень плотности мощности составляет 1 мВт/см2, что на площади круга диаметром 10 км соответствует мощности в 750 МВт. Этот уровень соответствует мощности современных электростанций.

## Оптоволоконная передача энергии

Передача энергии по оптическому волокну – это довольно новый способ питания различных потребителей электрической энергии с определенными требованиями к их эксплуатации. Технология оптической передачи энергии в сравнении с медной проводкой имеет ряд неоспоримых преимуществ. Во-первых, это энергопассивность и пожаробезопасность, то есть отсутствие причин возникновения электрических искр, во-вторых, предотвращение электромагнитных помех и отсутствие гальванических развязок, в-третьих, возможность использования в условиях, где необходимо соблюдать высокие требования к изоляции. В конечном счете это замена медных кабелей на легкие волоконно-оптические линии, что даст эффект в сокращении металлоемкости в различных проводящих и контрольно-измерительных цепях. Новизна данной технологии заключается в организации нового подхода построения системы электропитания потребителей, которая повышает уровень пожаробезопасности и электромагнитной совместимости за счет использования оптического волокна и его энергопассивности. В данном случае используется идея передачи энергии по оптическому волокну в виде световой волны. Также немаловажным преимуществом является возможность обеспечения резервирования энергетических каналов и повышение живучести какого-либо объекта, снижение стоимости за счет сокращения металлоемкости коммуникаций и повышение эффективности их работы.

Основное звено всей системы передачи энергии по оптическому волокну заключается в эффективном преобразовании электрической энергии в оптическую и обратно. На стороне передатчика это обычно достигается с помощью лазерного источника, характеризующегося высокой коэффициентом преобразования (η₁). При этом важно обеспечить максимальное совпадение параметров лазерного излучения (например, длины волны, когерентности, стезеобразности) с оптическими характеристиками используемого волокна. На приемном конце критичным является выбор и разработка фотоэлектрических преобразователей, например, фотодиодов или солнечных элементов, оптимизированных для работы на используемой волновой длине. Здесь эффективность преобразования (η₂) напрямую влияет на конечную производительность системы.

* Ограниченная эффективность преобразования:  
  Системы оптоволоконной передачи энергии требуют двух этапов преобразования: преобразования электрической энергии в оптическую (с помощью лазерного источника) и обратного преобразования оптической энергии в электрическую (с помощью фотоэлектрического преобразователя). На каждом из этих этапов происходят потери, что снижает общую энергоэффективность системы по сравнению с прямыми методами передачи.
* Ограничения по мощности:  
  Оптоволоконные линии обладают определённой пропускной способностью. При передаче высоких мощностей могут возникать проблемы, связанные с перегревом волокна, нелинейными эффектами и даже повреждением материала. Это ограничивает применение технологии в случаях, где требуется передача больших энергетических потоков.
* Чувствительность к механическим воздействиям:  
  Несмотря на преимущества в плане легкости и пожаробезопасности, оптоволоконные кабели достаточно хрупкие. Изгибы, вибрации или механические повреждения могут привести к увеличению потерь сигнала или поломке волокна, что требует разработки специальных защитных мер и повышает требования к качеству установки и эксплуатации.
* Сложность технологической реализации и высокая стоимость:  
  Использование высокоточных лазерных источников, специализированных фотоэлектрических преобразователей и систем контроля сопряжения параметров источника, волокна и приёмника делает систему оптоволоконной передачи энергии технологически сложной и дорогостоящей. Высокая стоимость компонентов и необходимость точной настройки всей системы ограничивают её широкое применение, особенно в условиях, где требуется экономическая эффективность.
* Потери на длинных расстояниях:  
  Хотя современные оптоволокна характеризуются низким коэффициентом затухания на определённых длинах волн, все же при передаче энергии на большие расстояния возникают потери за счёт рассеяния и поглощения. Для компенсации этих потерь могут потребоваться промежуточные усилители или ретрансляторы, что дополнительно усложняет конструкцию системы.

## Лазерный метод

Энергию можно передать путём её преобразования в луч лазера, который затем может быть направлен на фотоэлемент приёмника. Вплоть до недавнего времени передача энергии с помощью лазеров не имела большого смысла: их КПД составлял всего 10−20 %. С учетом потерь на передачу и преобразование световой энергии в электричество получателя достигало, в лучшем случае, нескольких процентов исходной мощности. Только в 2000-х годах ситуация начала меняться: появились инфракрасные лазеры с КПД до 40−50 % и высокоэффективные фотоэлектрические модули на основе арсенида галлия, способные преобразовывать в электричество до 40 %, а иногда – и до 70 % энергии излучения. Благодаря этому способу мы можем передать энергию на большие расстояния.

Лазерная передача энергии по сравнению с другими методами беспроводной передачи обладает рядом преимуществ:

* передача энергии на большие расстояния (за счёт малой величины угла расходимости между узкими пучками монохроматической световой волны);
* удобство применения для небольших изделий (благодаря небольшим размерам твердотельного лазера — фотоэлектрического полупроводникового диода);
* отсутствие радиочастотных помех для существующих средств связи, таких, как Wi-Fi и сотовые телефоны (лазер не создаёт таких помех);
* возможность контроля доступа (получить электроэнергию могут только приёмники, освещённые лазерным лучом).

Самый существенный из недостатков – атмосфера Земли, так как она поглощает большую часть энергии, переданной от лазера. Энергией с орбиты можно было бы снабжать всю Землю.

Помимо этого, у данного метода есть и ряд других недостатков:

* преобразование низкочастотного электромагнитного излучения в высокочастотное, которым является свет, неэффективно. Преобразование света обратно в электричество также неэффективно, так как КПД фотоэлементов достигает 40−50 %, хотя эффективность преобразования монохроматического света значительно выше, чем эффективность солнечных панелей;
* необходимость прямой видимости между передатчиком и приёмником (как и при микроволновой передаче).
* потенциальная опасность для живых организмов в случае отклонения передающего луча

Такие компании как NASA, EADS, Lasermotive занимаются такими технологиями уже с 2003 г. Ученые из Японии добились успеха в преобразовании солнечного света в лазерное излучение с КПД 42 %, но эффективные передатчики и приемники не могут совместно применяться, потому что работают в разных спектральных диапазонах. Вторая важная проблема – невозможность использовать передачу в пасмурную погоду. Если решить эти проблемы, то эту технологию для космической энергетики ждут большие перспективы.

Таким образом, сравнительный анализ показывает, что лазерная передача энергии в инфракрасном диапазоне обладает уникальными преимуществами, особенно с точки зрения высокой направленности и возможности эффективной интеграции лазерных источников с фотоэлектрическими приёмниками. Минимизация угловой расходимости инфракрасного лазерного луча позволяет существенно снизить потери при передаче энергии на большие расстояния. При дальнейшем совершенствовании технологий повышения КПД на этапах преобразования электрической энергии в лазерное излучение и обратно, данный метод представляется наиболее перспективным для реализации высокоэффективных и безопасных систем беспроводной энергетической передачи. Переходя от теоретических выкладок к практическому применению, необходимо подобрать платформу, которая позволит максимально эффективно использовать эти преимущества. Для решения задачи оптимизации передачи энергии посредством инфракрасного лазера предлагается использовать российский дрон «Голубь» с кассетным типом сброса боеприпасов. Такой выбор обусловлен не только высокой мобильностью и тактической универсальностью аппарата, но и его возможностью интеграции современной энергетической системы. Использование дрона «Голубь», представленном на рисунке 3, предоставляет уникальную возможность протестировать и внедрить инфракрасную лазерную систему передачи энергии в реальные боевые условия, что может значительно повысить эффективность выполнения поставленных задач.



Рисунок 3 – Беспилотный летательный аппарат «Голубь»

Ключевыми преимуществами БПЛА «Голубь» являются:

* Поворотная камера
* Подвес нескольких (2х – 3х) 82х миллиметровых мин
* Регулируемая полезная нагрузка

Характеристики дрона:

* Дальность полета до 10 км
* Высота полета до 500 метров
* Размер рамы 31 сантиметр
* Скорость полета от 40 км/ч
* Время полета до 20 минут

Исходя из представленных характеристик видно, что выделение массы под полезную нагрузку действительно позволяет расширить функциональные возможности аппарата. Однако такой подход неизбежно приводит к сокращению энергетического резерва, что уменьшает время полёта. Таким образом, хоть и удаётся интегрировать дополнительные системы, общая длительность полёта оказывается сниженной.

При этом сокращение автономности становится особенно критичным в условиях быстро меняющейся тактической обстановки. Уменьшение времени полёта может негативно отразиться на оперативной мобильности БПЛА, ограничивая возможности для своевременного реагирования на изменения на поле боя.

# Глава 1. Анализ ключевых параметров передачи энергии

Одним из ключевых факторов, влияющих на эффективность передачи энергии, является воздействие атмосферных явлений. Атмосферные условия, включая уровень влажности, наличие тумана, дождя и присутствие пыли или других аэрозолей, способны существенно снижать мощность лазерного луча. Эти явления приводят к рассеиванию и поглощению излучения, что, в свою очередь, вызывает энергетические потери. Следовательно, для увеличения коэффициента полезного действия важно принимать во внимание метеорологические прогнозы и разрабатывать адаптивные системы, способные нейтрализовать воздействие неблагоприятных атмосферных условий.

Также расходимость луча имеет важное значение для эффективности передачи энергии. Чем меньше расходимость, тем более сосредоточенным остается луч на протяжении всего своего пути распространения. Это способствует доставке большего объема энергии к цели с минимальными потерями, однако, слишком малая расходимость луча делает сложнее процесс наведения и стабилизации луча на фотоприемнике. Тем не менее, достижение минимальной расходимости требует применения высокоточных оптических системами.

Кроме того, угол отклонения луча от нормали к площади фотоприемника оказывает значительное воздействие на коэффициент полезного действия. При изменении направления луча от нормали увеличивается путь, который должен пройти луч, что может привести к дополнительным потерям из-за рассеивания и поглощения. Следовательно, оптимизация угла излучения представляет собой важную задачу для повышения эффективности передачи.

В заключение, угол смещения луча относительно центра матрицы фотоприемников также является критически важным. Если поток света не фокусируется непосредственно на центральной части приемной матрицы, это может привести к существенному снижению эффективности преобразования фотонной энергии в электрическую. В этой главе мы внесем более тщательный анализ каждого из этих факторов, уделим им внимание влияния на коэффициент полезного действия системы.

## Влияние атмосферных условий на эффективность передачи

Ослабление светового излучения на пути его распространения в атмосфере обусловлено несколькими физическими явлениями, такими как дисперсия, поглощение и рассеяние, каждое из которых вносит свой вклад в уменьшение эффективности передачи энергии.

### Типы взаимодействия света и среды

Дисперсия в контексте лазерной передачи энергии представляет собой явление, при котором компоненты светового излучения с различными длинами волн распространяются с различными скоростями в атмосфере. Такое различие в скоростях приводит к растяжению и искажению лазерного импульса по мере его продвижения. В результате фокусировка энергии на приемнике ухудшается, что снижает эффективность передачи.

Лазерное излучение распространяется узким пучком в атмосфере на расстояния до 1000 метров влияние дисперсии сводится к минимуму. Это подтверждается уравнением Селлмейера для показателя преломления (1), где и – эмпирические коэффициенты для атмосферных газов. Ввиду того, что излучение имеет очень узкий спектральный диапазон изменение показателя преломления в пределах этого диапазона будет пренебрежимо малым, что, в свою очередь, минимизирует дисперсионные потери.

Поглощение происходит, когда лазерное излучение взаимодействует с молекулами воздуха и других газов в атмосфере. Каждое взаимодействие приводит к тому, что часть энергии лазера преобразуется в тепло, поглощаясь молекулами. Основной причиной поглощения излучения в тропосфере является колебательно-вращательные переходы.

Рассеяние возникает, когда лазерный луч сталкивается с частицами, взвешенными в атмосфере, такими как пыль, капли дождя или аэрозоли. Эти частицы отклоняют часть лазерного излучения от его первоначальной траектории, вызывая потерю энергии. Рассеяние может значительно усиливаться в условиях неблагоприятной погоды, например, в тумане или во время дождя, что делает этот фактор критическим для стабильности и эффективности передачи энергии.

Выделяют два типа рассеяния излучения в непрозрачной среде:

* 1. Рэлеевское рассеяние – явление, при котором рассеяние излучения происходит на частицах сильно меньше длины волны. В момент, когда электромагнитная волна излучения проходит сквозь поле частиц, электрическое поле волны индуцирует заряды внутри частиц, создавая дипольные моменты внутри частиц и тем самым заставляет эти диполи переизлучать свет во всех направлениях, что в совокупности приводит к общему рассеянию пучка излучения. Однако, так как Рэлеевское рассеяние обратно пропорционально четвертой степени длины волны, то по мере увеличения длины волны, то есть смещения ее в сторону ИК диапазона, интенсивность рассеяния резко уменьшается, делая его все менее заметным.
  2. Рассеяние Ми – явление, при котором рассеяние излучения происходит на частицах сопоставимых длине волны излучения. Данный тип рассеяния особенно важно учитывать, когда в атмосфере присутствуют капли воды, частицы пыли и прочие аэрозоли. Оно может быть описано через решение уравнений Максвелла для сферических частиц. В момент, когда волна излучения «сталкивается» с частицей она изменяет свое направление от первоначального ввиду преломления, описываемого законом Снеллиуса. Волны, преломленные и отраженные внутри и снаружи частицы, могут интерферировать друг с другом, создавая сложные узоры рассеяния, которые зависят от угла наблюдения. Это приводит к тому, что свет рассеивается неравномерно по разным направлениям, с преобладанием рассеяния вперёд, особенно для крупных частиц.
  3. Турбулентное рассеяние – явление, возникающее из-за наличия неоднородностей показателей преломления воздуха, вызванных турбулентностью атмосферы, которое наряду с рассеянием Ми способно оказать существенное влияние на снижение интенсивности излучения. Описать турбулентное рассеяние можно также исходя из закона Снеллиуса вдоль тракта.