



Международный журнал информационных технологий и энергоэффективности

Сайт журнала:

<http://www.openaccessscience.ru/index.php/ijcse/>



УДК 535 (623.4) (355)

## АНАЛИЗ ВОЗДЕЙСТВИЯ ЛАЗЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ НА ОПТИЧЕСКИЕ УСТРОЙСТВА БПЛА

**Ворганов А.А., Котенёв Е.В., <sup>1</sup>Курдюмов И.А., Каленский И.А., Федоров А.М.**  
*ФГБОУ ВО «МИРЭА - РОССИЙСКИЙ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ», г. Москва, Россия (119454, г. Москва, Пр-т Вернадского, д. 78, стр.4), e-mail: <sup>1</sup>kurdyumov-2003@mail.ru*

В данной статье рассматривается воздействие лазерного излучения на оптические устройства беспилотных летательных аппаратов (БПЛА). Особое внимание уделяется анализу механизмов повреждения оптических компонентов под воздействием высокоэнергетического лазерного излучения, а также методам защиты и минимизации рисков. Исследование включает экспериментальные данные и теоретические модели, которые позволяют оценить устойчивость различных типов оптических устройств к лазерному воздействию. Результаты исследования могут быть полезны для разработки более надежных и устойчивых оптических систем для БПЛА, а также для повышения их безопасности и эффективности в условиях потенциальных угроз.

Ключевые слова: Лазерное излучение, оптические устройства, беспилотные летательные аппараты (БПЛА), повреждение оптических компонентов, защита оптических систем, экспериментальные данные, теоретические модели.

## ANALYSIS OF THE EFFECT OF LASER RADIATION ON UAV OPTICAL DEVICES

**Varganov A.A., Kotenev E.V., Kurdyumov I.A., Kalensky I.A., Fedorov A.M.**  
*MIREA - RUSSIAN TECHNOLOGICAL UNIVERSITY, Moscow, Russia (119454, Moscow, avenue. Vernadsky, 78, b. 4), e-mail: <sup>1</sup>kurdyumov-2003@mail.ru*

This article examines the effect of laser radiation on the optical devices of unmanned aerial vehicles (UAVs). Special attention is paid to the analysis of the mechanisms of damage to optical components under the influence of high-energy laser radiation, as well as methods of protection and risk minimization. The study includes experimental data and theoretical models that allow us to assess the resistance of various types of optical devices to laser exposure. The results of the study can be useful for the development of more reliable and stable optical systems for UAVs, as well as for improving their safety and effectiveness in the face of potential threats.

Keywords: Laser radiation, optical devices, unmanned aerial vehicles (UAVs), damage to optical components, protection of optical systems, experimental data, theoretical models.

### Введение

Лазерные системы становятся все более актуальным и эффективным средством поражения различных целей, включая беспилотные летательные аппараты (БПЛА). В связи с развитием технологий и появлением новых угроз в области беспилотной авиации, вопрос применения лазерных систем для уничтожения БПЛА становится все более важным. Целью данной статьи является изучение перспектив и применения лазерных систем для поражения беспилотных летательных аппаратов через оптические устройства. Более конкретно, статья будет посвящена анализу возможностей лазерных систем в обнаружении, отслеживании, безопасном отключении и уничтожении беспилотных летательных аппаратов.

Актуальность данной темы обусловлена ростом числа беспилотных летательных аппаратов, которые могут использоваться как для военных, так и для гражданских целей. Они представляют серьезную угрозу для безопасности и конфиденциальности, требуя эффективных методов обнаружения и поражения. Анализ перспектив и применения лазерных систем для уничтожения БПЛА является актуальной задачей, целью которой является определение возможностей и ограничений данного метода борьбы с угрозами, представляемыми беспилотными летательными аппаратами.

## **1. Теоретические и физические основы лазерных систем для поражения беспилотных летательных аппаратов**

### **1.1. Принцип работы лазера заключается в следующих этапах**

**Усиление излучения:** В основе работы лазера лежит процесс усиления световых волн. Атомы или молекулы в активной среде лазера переходят из возбужденного состояния в основное, испуская фотоны. При этом высвобожденные фотоны могут стимулировать другие атомы к испусканию дополнительных фотонов того же частотного и фазового состояния, что приводит к усилению излучения.

**Механизм генерации лазерного излучения:** Для генерации лазерного излучения необходимо создать инверсную заселенность уровней энергии в активной среде лазера. Это достигается путем накачки активной среды энергией, которая вынуждает атомы или молекулы переходить в возбужденное состояние. Затем, при стимулированном излучении, происходит усиление световых волн, что приводит к генерации лазерного излучения.

**Основные компоненты лазеров:** Основными компонентами лазеров являются активная среда (обычно это кристалл, газ или полупроводник), оптический резонатор (зеркала, обеспечивающие многократное отражение световых волн внутри резонатора) и источник накачки (обычно это лампы или полупроводниковые диоды). Также в лазерных системах могут применяться дополнительные элементы, такие как модуляторы, оптические фильтры и детекторы.[1]

### **1.2. Характеристики влияющие на поражение цели**

Смертоносность лазера зависит от многих характеристик, но упрощенно нам будет достаточно следующих:

Одним из ключевых параметров лазерного оружия является выходная мощность. Это количество энергии, которое излучается лазером в виде светового пучка. Чем выше выходная мощность, тем мощнее и эффективнее лазерное оружие. Однако, увеличение выходной мощности приводит к увеличению расходов на энергию и системы охлаждения, а также к увеличению габаритов и массы лазерной установки.

Еще одним важным фактором, влияющим на эффективность лазерного оружия, является расстояние до цели и как следствие - явление дифракции. При увеличении расстояния до цели лазерный луч расширяется, что приводит к уменьшению плотности энергии на поверхности цели. [2] Чем больше расстояние до цели, тем сильнее влияние дифракции на эффективность лазерного оружия. Кроме того, длина волны лазерного излучения также влияет на степень расходимости луча, чем больше длина волны, тем сильнее расходится луч на расстоянии.

Длина волны лазерного излучения также играет важную роль в эффективности лазерного оружия. Чем короче длина волны, тем выше энергия фотонов и тем сильнее взаимодействие лазерного излучения с целью. Однако, создание мощных лазерных систем с короткой длиной волны является технологически сложной задачей.

Коэффициент  $M^2$  является важным параметром, который характеризует качество лазерного луча и его способность фокусироваться на цели. Коэффициент  $M^2$  равен 1 для идеального лазерного луча, который ограничен только дифракцией. Однако, в реальных лазерных системах коэффициент  $M^2$  обычно превышает 1, что свидетельствует о наличии аберраций и искажений в лазерном луче.

Наконец, размер зеркала в лазерных системах также влияет на эффективность лазерного оружия. В лазерных системах используются термостойкие зеркала, которые направляют лазерный луч изнутри установки на подвижную турель, которая фокусирует лазерное излучение на цель с помощью главного зеркала. Чем больше размер зеркала, тем лучше лазерный луч может фокусироваться на цели, создавая как можно меньшую точку на поверхности цели.

Все эти данные являются вводными, с их помощью можно получить еще две принципиально важные для нас величины: диаметр лазерного пятна [м] и энергия лазера, попадающая на поверхность цели [КВт/см<sup>2</sup>].

Таким образом, эффективность лазерного оружия зависит от многих факторов, включая выходную мощность, расстояние до цели, дифракцию, коэффициент  $M^2$ , длину волны и размер зеркала. При проектировании и использовании лазерных систем необходимо учитывать все эти факторы, чтобы достичь максимальной эффективности лазерного оружия. [3]

Но если изменение вышеперечисленных параметров на более выгодные является достаточно проблематичной задачей, мы можем работать с менее прямыми, но не менее эффективными параметрами. Таким как частота следования импульсов — это количество импульсов, которые формируются лазером в единицу времени. Перспективы работы с этим параметром подробно разобраны в следующем пункте.

## **2. Ослепление и вывод из строя оптических систем беспилотников с помощью лазеров**

Ослепление и вывод из строя оптических систем беспилотников с помощью лазеров основываются на физических явлениях взаимодействия излучения с веществом. Когда лазерный луч попадает на поверхность оптического элемента, происходит поглощение энергии излучения и преобразование ее в тепловую. Это приводит к локальному нагреву поверхности и, как следствие, к термическому разрушению или деформации оптического элемента. При этом, степень повреждения зависит от мощности лазера, длительности воздействия, свойств материала оптического элемента и других факторов.

Также, важную роль играет явление дифракции света. При лазерном ослеплении дифракция может приводить к тому, что луч, преломляется от самой оптической системы БПЛА и рассеивается на соседние элементы, что увеличивает зону повреждения.

Эти физические явления и законы подтверждаются многочисленными исследованиями в области лазерной физики и оптики. Например, в статье «Laser-Induced Damage in Optical Materials» авторы рассматривают механизмы повреждения оптических материалов под

действием лазерного излучения и приводят примеры экспериментальных исследований, подтверждающих эти механизмы.

Экспериментальные исследования показали, что лазерные системы могут быть эффективным средством их поражения. Например, экспериментальная передвижная наземная лазерная система «Афина», представленная в 2017 г компанией Lockheed Martin, была оснащена опытной демонстрационной гибридной лазерной установкой (твердотельный лазер + оптоволоконная активная среда) с заявленной мощностью непрерывного излучения 30 кВт. [4] Установка при тестировании смогла успешно сбить пять задействованных в испытаниях беспилотников. Радиус эффективного действия при такой мощности лазера достигает полутора километров при отведенном времени на уничтожение от 2 до 5 секунд.



*Рисунок 1. - Наглядное изображение воздействия лазера на оптику БПЛА.*

На Рисунке 1 представлено наглядное изображение воздействия лазера (достаточно слабого и свободного даже для гражданской продажи) на БПЛА. Мы можем отчетливо видеть какое сильное воздействие лазера получает оптика беспилотника. Оператор БПЛА вынужден или

отвернуть камеру, а соответственно потерять контакт с фронтом (противником), или получить высокий риск повреждения матрицы камеры или самого беспилотника. Выполнение боевых задач сводится к нулю, значительно затрудняется управление и в дополнение возникает опасность уничтожения беспилотника с помощью других средств ПВО (или даже стрелкового оружия, при условии низкой высоты полета).[5]

### **3.Расчёт эффективности лазеров в борьбе с БПЛА**

Для оценки эффективности лазеров проведем моделирование и расчёт их действия на оптику БПЛА. При этом мы будем учитывать такие факторы как: выходная мощность излучения лазера, длина волны, расстояние до цели, характеристики оптики самой установки.

На основе результатов проведем анализ эффективности лазерных систем и опишем оптимальные параметры для их применения в конкретных условиях. В процессе расчёта эффективности лазеров необходимо также учитывать особенности конкретного типа БПЛА, такие как тип и размер оптики, материал корпуса, наличие систем защиты от лазерного

излучения и другие факторы, но из-за огромной вариативности, будет произведен общий анализ с несколькими конкретными примерами.

Для наглядности расчеты представлены в виде таблиц ниже.

Таблица 1. - Расчёты №1 различных настроек лазера.

	Выходная мощность, <i>КВт</i>	Расстояние, <i>км</i>	Коэфф. $M^2$	Длина волны, <i>мкм</i>	Радиус зеркала, <i>м</i>	Диаметр пятна, <i>м</i>	Энергия, <i>КВт/см<sup>2</sup></i>
Вводные данные установки						Расчётные данные	
№1	50	5	2	1,315	0,5	<b>0,0263</b>	<b>9,20383271</b>
№2	70	5	2	1,315	0,5	<b>0,0263</b>	<b>12,8853651</b>
№3	50	3	2	1,315	0,5	<b>0,0157</b>	<b>25,5662019</b>
№4	50	5	1,5	1,315	0,5	<b>0,0197</b>	<b>16,3623692</b>
№5	50	5	2	1,425	0,5	<b>0,0285</b>	<b>7,83773351</b>
№6	50	5	2	1,315	0,7	<b>0,0187</b>	<b>18,0395121</b>
№7	40	5	2	1,115	0,5	<b>0,0223</b>	<b>10,2414270</b>
№8	30	2	2	1,315	0,2	<b>0,0263</b>	<b>5,52229962</b>
№9	100	7	2	1,315	0,5	<b>0,0368</b>	<b>9,39166603</b>
№10	200	10	2	1,315	0,5	<b>0,0526</b>	<b>9,20383271</b>
№11	20	1	3	1,315	0,1	<b>0,0394</b>	<b>1,63623692</b>
№12	20	2	3	1,315	0,3	<b>0,0263</b>	<b>3,68153308</b>
№13	50	3	2	1,615	0,2	<b>0,04845</b>	<b>2,71201851</b>
№14	10	2	2	1,315	0,3	<b>0,01753</b>	<b>4,14172472</b>

Данные говорят о возможности использования подобных систем для полного уничтожения БПЛА противника, но используемая мощность слишком высока для практического использования. Но если сконцентрироваться на взаимодействии на оптику, то для этой цели можно использовать меньшую мощность.

Приведем пример со стандартным материалом в матрицах камер - кремний. При попадании на фотокатод лазерного импульса он поглощает излучение всей своей толщиной и нагревается (температура уничтожения 1415 С). [6] При наносекундных импульсах можно в первом приближении пренебречь теплоотводом в стеклянную подложку. При попадании на структуру мощного лазерного импульса излучение поглощается, в основном, в материале металлических дорожек и в полупроводниковых слоях. Поглощением в изолирующих слоях можно пренебречь. Поглощенное излучение преобразуется в тепло. Наибольшую концентрацию тепловыделения можно ожидать в металлических дорожках и сильно легированных областях полупроводника.

Таким образом, мощность достаточная для выхода из строя кремниевых фотокатодов в камере равна приблизительно 1,6кВт. Из результатов измерений видно, что данная мощность достигается всеми рассмотренными лазерами, даже лазером мощностью 20кВт на расстоянии 1км. При этом диаметр пучка лазера будет достаточной ширины для попадания по БПЛА. Учитывая предыдущие выводы, представим новые расчёты, с некоторыми дополнительными условиями, а также диаграмму соотношения диаметра пятна и энергии. Во-первых,

измерение №11 в первой таблице перенесем во вторую, так как оно идеально удовлетворяет условию достаточной мощности взаимодействия на камеру БПЛА и имеет реалистичную требуемую мощность. Во-вторых, эффективным расстоянием поражения примем 1 километр.

Таблица 2. - Расчёты №2 различных настроек лазера

	Выходная мощность, <i>КВт</i>	Расстояние, <i>км</i>	Коэфф. <i>M2</i>	Длина волны, <i>мкм</i>	Радиус зеркала, <i>м</i>	Диаметр пятна, <i>м</i>	Энергия, <i>КВт/см2</i>
	Вводные данные установки					Расчётные данные	
№1	20	1	3	1,315	0,1	<b>0,0394</b>	<b>1,63623692</b>
№2	15	1	3	1,315	0,1	<b>0,0394</b>	<b>1,22717769</b>
№3	15	1	3	1,15	0,1	<b>0,0345</b>	<b>1,60458703</b>
№4	15	1	3	1,315	0,2	<b>0,0197</b>	<b>4,90871077</b>
№5	10	1	2	1,315	0,1	<b>0,0263</b>	<b>1,84076654</b>
№6	5	1	3	1,315	0,1	<b>0,0394</b>	<b>0,40905923</b>
№7	5	1	2	1,315	0,2	<b>0,0131</b>	<b>3,68153308</b>
№8	5	1	2	1,315	0,1	<b>0,0263</b>	<b>0,92038327</b>
№9	5	1	3	1,315	0,2	<b>0,0197</b>	<b>1,63623692</b>
№10	3	1	2	1,315	0,2	<b>0,0131</b>	<b>2,20891985</b>
№11	3	1	3	1,115	0,2	<b>0,0167</b>	<b>1,36552360</b>
№12	3	1	2	1,115	0,1	<b>0,0223</b>	<b>0,76810702</b>
№13	2	1	2	1,315	0,3	<b>0,0087</b>	<b>3,31337977</b>
№14	1	1	2	1,315	0,3	<b>0,0087</b>	<b>1,65668988</b>
№15	1	1	3	1,315	0,5	<b>0,0078</b>	<b>2,04529616</b>

По итогу вторых измерений мы можем сказать, что существуют различные условия для поражения БПЛА с помощью лазеров. Так же мы получили ясную зависимость различных настроек и итоговых результатов воздействия. Например, диаграмма на Рисунке 2 показывает, что с увеличением диаметра пятна лазерного пучка, уменьшается энергия воздействия на беспилотник и наоборот, но также итоговые параметры зависят от других настроек. Более подробно все зависимости расписаны в таблицах ранее.





Рисунок 2. - Диаграмма соотношений диаметра пятна и энергии.

#### 4. Применение определенных лазерных систем для поражения беспилотных летательных аппаратов

##### 4.1. Лазерные системы на основе УКЛИ против БПЛА

Одним из перспективных направлений развития лазерных систем для поражения беспилотников является использование ультракоротких лазерных импульсов (УКЛИ). Это связано с тем, что УКЛИ обладают рядом преимуществ по сравнению с традиционными лазерными системами, такими как высокая пиковая мощность, короткая длительность импульса и низкое тепловое воздействие на окружающую среду.

Принцип действия лазерных систем, основанных на использовании УКЛИ, заключается в генерации лазерных импульсов длительностью до 5 фс ( $5 \cdot 10^{-15}$  с). При этом пиковая мощность таких импульсов может достигать нескольких тераватт (в лабораторных условиях достигает петаватт), что значительно превышает мощность традиционных лазерных систем.

Одним из ключевых преимуществ лазерных систем, основанных на использовании УКЛИ, является их способность генерировать лазерные импульсы с очень высокой частотной шириной спектра. Это позволяет эффективно поражать оптические системы беспилотников за счет эффекта многофотонной ионизации. При этом процессе лазерное излучение поглощается оптическими элементами беспилотника, что приводит к их разрушению.

Кроме того, лазерные системы, основанные на использовании УКЛИ, могут эффективно использоваться для поражения целей, находящихся в движении. Это связано с тем, что короткая длительность лазерных импульсов позволяет минимизировать влияние эффекта Доплера, который может снизить эффективность поражения движущихся целей.

Одним из примеров лазерных систем, основанных на использовании УКЛИ, является система LWIR (Long-Wave Infrared) Laser Weapon, разработанная компанией Raytheon. Эта система использует лазерные импульсы длительностью несколько пикосекунд и пиковую мощность несколько киловатт. LWIR Laser Weapon способна эффективно поражать оптические системы беспилотников на расстоянии до нескольких километров.

#### **4.2. Лазерные системы на основе высокоэнергетических лазеров**

Разработанный армией США, HEL MD представляет собой наземную лазерную систему, способную противостоять различным угрозам, включая беспилотники. Она использует высокоэнергетический лазер для выведения из строя или уничтожения беспилотников, либо ослепляя их оптические системы, либо нанося физические повреждения.

В системе HEL MD используется твердотельный лазер, генерирующий высокосфокусированный луч света в инфракрасном диапазоне. Лазерный луч создается путем усиления низкоэнергетического лазерного луча с помощью ряда специализированных оптических компонентов, включая усилители и резонаторы. Полученный высокоэнергетический лазерный луч направляется на цель с помощью высокоточной системы слежения.

Когда лазерный луч попадает на цель, он быстро нагревает ее поверхность это может привести к физическому повреждению цели, например расплавлению или прогоранию компонентов оптики или к выходу из строя или датчиков БПЛА.

Система HEL MD разработана с высокой точностью, что позволяет ей фокусировать лазерный луч на очень маленькой области цели. Это позволяет нейтрализовать или уничтожить цель с минимальным сопутствующим ущербом.

В целом система HEL MD использует принцип направленной энергии для генерации высокосфокусированного лазерного луча, который может нейтрализовать или уничтожить цель.

#### **Заключение**

В статье рассмотрены перспективы и применение лазерных систем для поражения беспилотных летательных аппаратов. Было показано, что оптические системы беспилотников являются одними из наиболее уязвимых компонентов, и их вывод из строя может быть эффективным способом нейтрализации БПЛА.

Обзор существующих разработок лазерных систем для поражения беспилотников показал, что перспективными являются системы, основанные на использовании ультракоротких лазерных импульсов и высоко-сфокусированных лучах в инфракрасном диапазоне. Перспективы развития лазерных систем для поражения беспилотников связаны с дальнейшим совершенствованием технологий генерации ультракоротких лазерных импульсов, а также с разработкой новых методов использования высоко-сфокусированных лучей в инфракрасном диапазоне. Одним из перспективных направлений является создание систем, способных автоматически обнаруживать и сопровождать цели, а также оптимизировать параметры лазерного излучения в зависимости от типа и характеристик оптических систем беспилотника.

В общем, лазерные системы для поражения беспилотников являются перспективным направлением развития военной техники, и их дальнейшее совершенствование будет способствовать повышению эффективности борьбы с беспилотными летательными аппаратами.



### Список литературы

1. Аполлонов В. В. Лазерное оружие: проблемы и перспективы //Путь науки. – 2016. – №. 2. – С. 33.
2. Leonovich G. I. et al. Airborne LIDAR in ensuring gliding UAV flight mode //VESTNIK of Samara University. Aerospace and Mechanical Engineering. – 2014. – Т. 13. – №. 2. – С. 88-90.
3. П. Г. Крюков, “Лазеры ультракоротких импульсов”, Квантовая электроника, 31:2 (2001), С. 96–101
4. Шайдаев М. Ш. Лазерные системы для борьбы с беспилотными летательными аппаратами: преимущества и недостатки //Академическая мысль. – 2023. – №. 4 (25). – С. 157-162.
5. Ristau D. (ed.). Laser-induced damage in optical materials. – CRC Press, 2014.
6. Bennett H. E. et al. Laser-induced damage in optical materials: fifteenth ASTM symposium //Applied optics. – 1986. – Т. 25. – №. 2. – С. 290-270.

### References

1. Apollonov V. V. Laser weapons: problems and prospects //The path of science. - 2016. – No. 2. – p. 33.
  2. Leonovich G. I. et al. Airborne LASER in ensuring gliding UAV flight mode //VESTNIK of Samara University. Aerospace and Mechanical Engineering. - 2014. – Vol. 13. – No. 2. – pp. 88-90.
  3. P. G. Kryukov, “Ultrashort pulse lasers”, Quantum Electronics, 31:2 (2001), pp. 96-101
  4. Shaidaev M. S. Laser systems for combating unmanned aerial vehicles: advantages and disadvantages //Academic thought. – 2023. – №. 4 (25). – Pp. 157-162.
  5. Ristau D. (ed.). Laser-induced damage in optical materials. – CRC Press, 2014.
  6. Bennett H. E. et al. Laser-induced damage in optical materials: fifth ASTM symposium //Applied optics. – 1986. – vol. 25. – No. 2. – pp. 290-270.
-