

ИСТОЧНИКИ И ПРИЕМНИКИ ОПТИЧЕСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ

УДК 629.1.018.3

Потенциал лазерной системы посадки самолетов

Г.А. Калошин¹, Г.Г. Матвиенко¹, С.А. Шишкин¹, В.И. Анисимов²,
В.В. Бутузов², В.В. Жуков², Г.В. Столяров³, В.П. Пасюк^{3*}

¹ *Институт оптики атмосферы им. В.Е. Зуева СО РАН*

634055, г. Томск, пл. Академика Зуева, 1

² *Научно-исследовательский институт «Экран»*

443022, г. Самара, пр. Кирова, 24

³ *Научно-производственное объединение «ЛЭМЗ»*

127411, г. Москва, Дмитровское шоссе, 110

Поступила в редакцию 30.11.2015 г.

Приведены результаты расчетов эффективности лазерной системы посадки (ЛСП) на основе определения минимально необходимых потоков рассеянного излучения от неподвижных протяженных ориентиров (НПО), являющихся индикаторами ЛСП, при зрительном обнаружении НПО в реальных условиях эксплуатации. Показано, что при метеорологической дальности видимости $S_m = 800$ м минимально необходимые мощности для надежного обнаружения лазерных пучков курсоглиссадной группы в ночных условиях с расстояний $L \approx 1,0\text{--}1,6$ км составляют $P_{\min} = 0,5$ Вт для $\lambda = 0,52$ и $0,64$ мкм при отклонениях от глиссады на угол $\varphi = 0\text{--}5^\circ$. В сумеречных условиях зеленые и красные лучи видны с дистанций $L = 1\text{--}1,2$ км. Проведенные расчеты подтвердили возможность создания ЛСП на основе лазеров нового поколения, способной обеспечить посадку самолетов в условиях I категории ИКАО (Международная организация гражданской авиации).

Ключевые слова: аэрозольное ослабление, дальность видимости, перенос излучения, лазерные пучки, система посадки, программный пакет; aerosol extinction, visibility, radiative transfer, laser beams, landing system, software package.

Введение

Наиболее эффективным путем повышения регулярности и безопасности полетов является комплексное использование радио- и светотехнических средств посадки. При этом на заключительном этапе посадки зрительные системы имеют решающее значение, особенно в условиях плохой видимости. Светосигнальная навигационная информация светотехнических систем посадки (СП) является простой по своему восприятию, а сама СП с участием человека обладает высокой надежностью при изменении метеоусловий, прежде всего метеорологической дальности видимости. Другими словами, светотехнические СП – гарантия безопасности радиотехнических и космических средств обеспечения полетов. Именно это и предопределяет интенсивное развитие и непрерывное совершенствование светотехнических СП.

Институт оптики атмосферы им. В.Е. Зуева СО РАН в кооперации выполнил ряд НИР по исследованию возможностей и созданию элементов лазерной системы посадки (ЛСП) [1]. Одновременно с этим в ФГУП «КБАС», а затем в АО «НИИ «Экран» также выполнялись НИОКР по разработке ЛСП, основанной на наблюдении рассеянного излучения от неподвижных лазерных пучков. Пучки формируют в зоне ориентирования навигационный символ, ориентируясь по которому можно с высокой точностью зрительно определить местоположение самолета относительно глиссады и курса [2]. Впоследствии эти работы были продолжены совместно с целью создания комбинированной ЛСП под общим брендом «Глиссада». При этом основной проблемой, сдерживающей создание ЛСП, были лазеры. Они не обеспечивали необходимых энергетических, надежности, энергопотребления и весогабаритных характеристик. Все это не позволяло в полной мере раскрыть возможности комбинированной ЛСП.

Аналогичные работы проводятся и за рубежом. Имеется ряд публикаций в зарубежной печати, так или иначе затрагивающих различные характеристики возможных ЛСП. Так, в [3] сообщается, что на инженерной станции Lakehurst (штат Нью Джерси, США) разработана ЛСП на основе полупроводнико-

* Геннадий Александрович Калошин (gkaloshin@iao.ru); Геннадий Григорьевич Матвиенко (mgg@iao.ru); Сергей Александрович Шишкин (shishkin_s@mail.ru); Вячеслав Иванович Анисимов (mail@niekran.ru); Владимир Васильевич Бутузов (mail@niekran.ru); Владимир Валентинович Жуков (mail@niekran.ru); Геннадий Владимирович Столяров (lemz@tsr.ru); Виктор Павлович Пасюк (lemz@tsr.ru).

вых лазеров. Кроме того, для этих же целей в зарубежной авиации широко используется оптическая посадочная система FLOLS с системой линз Френеля, ее последняя улучшенная модификация IFLOLS представлена двумя типами: МК 13 и МК 14 [4].

В настоящее время в эксплуатации на аэродромах находятся различные светотехнические СП, работающие совместно с огнями высокой интенсивности (ОВИ), состав и размещение которых зависят от категории аэропорта. К ним можно отнести наиболее распространенную СП – систему визуальной индикации глиссады VASI [5], и указатель траектории точного захода на посадку PAPI [6]. Эти СП близки к ЛСП по назначению и решаемым задачам, однако они не обеспечивают необходимой точности при заходе по глиссаде и не задают при этом курс.

ЛСП типа «Глиссада» осуществляет надежный визуальный контакт с местом прибытия ввиду высокой цветовой контрастности лазерного излучения на фоне традиционных сигнальных огней, обеспечивая при этом исключительно высокую точность при заходе по курсу и глиссаде.

На сегодняшний день разработаны коммерческие полупроводниковые лазеры, генерирующие непрерывное излучение с необходимыми длинами волн и мощностями, с наработкой на отказ в десятки тысяч часов, с энергопотреблением отдельного лазерного модуля в единицы–десятки ватт и с несопоставимыми для других лазеров весогабаритными характеристиками [7–9]. Они выгодно отличаются от использовавшихся ранее газовых лазеров, учитывая, что в данном случае не требуется высокое качество лазерного пучка.

Все это делает возможным создание нового поколения ЛСП «Глиссада», способных заменить энергоемкие и трудоемкие светотехнические СП типа ОВИ и обеспечить посадку самолетов в условиях I категории ИКАО (Международная организация гражданской авиации).

Основная задача, решаемая в данной статье, состояла в расчетах минимально необходимых мощностей излучения лазерных источников курсоглиссадной группы и источников, обозначающих границы

взлетно-посадочной полосы (ВПП) и осевую линию, при которых обеспечивается уверенное ориентирование при заходе на посадку, пробеге и взлете в ночных и сумеречных условиях с удалений 1–1,6 км в условиях I категории ИКАО. При этом система полностью безопасна для летного экипажа. Вопросы безопасности при работе ЛСП рассматриваются в отдельной статье [10].

1. Схема расположения ЛСП на ВПП

Основой для расчета минимально необходимых мощностей излучения ЛСП является схема, приведенная на рис. 1. ЛСП состоит из курсового лазерного маяка (ЛМ1), расположенного на оси ВПП у порога ВПП; двух глиссадных лазерных маяков (ЛМ2, ЛМ3), расположенных по обе стороны ВПП в районе места приземления; двух лазерных маяков для индикации боковых границ ВПП (ЛМ4, ЛМ5), расположенных по обе стороны ВПП; двух лазерных маяков для индикации оси ВПП (ЛМ6, ЛМ7), расположенных на оси в конце ВПП. Лазерные пучки направлены навстречу самолету в соответствии с угловыми размерами, указанными на рис. 1.

С точки зрения зрительного восприятия навигационный символ ЛСП можно разделить на две группы лазерных пучков: лучи индикации курса и глиссады и лучи индикации оси и боковых границ ВПП, которые отличаются расположением и, соответственно, величиной рассеянного излучения в направлении пилота.

Введем обозначения исходных параметров геометрии схемы расположения ЛСП, необходимые для расчетов: a – длина ВПП; b – ширина ВПП; a_k – расстояние от порога ВПП до ЛМ1; $a_{гл}$ – расстояние от порога ВПП до ЛМ2 (ЛМ3); $a_{тр}$ – расстояние от порога ВПП до ЛМ4 (ЛМ5); a_o – расстояние от порога ВПП до ЛМ6 (ЛМ7); $b_{гл}$ – расстояние от оси ВПП до ЛМ2 (ЛМ3); $b_{тр}$ – расстояние от оси ВПП до ЛМ4 (ЛМ5); $\alpha_{ос}$ – азимут луча индикации оси ВПП, равный $1-3^\circ$; β_k – угол места луча индикации курса, равный $2^\circ 20'-2^\circ 30'$;

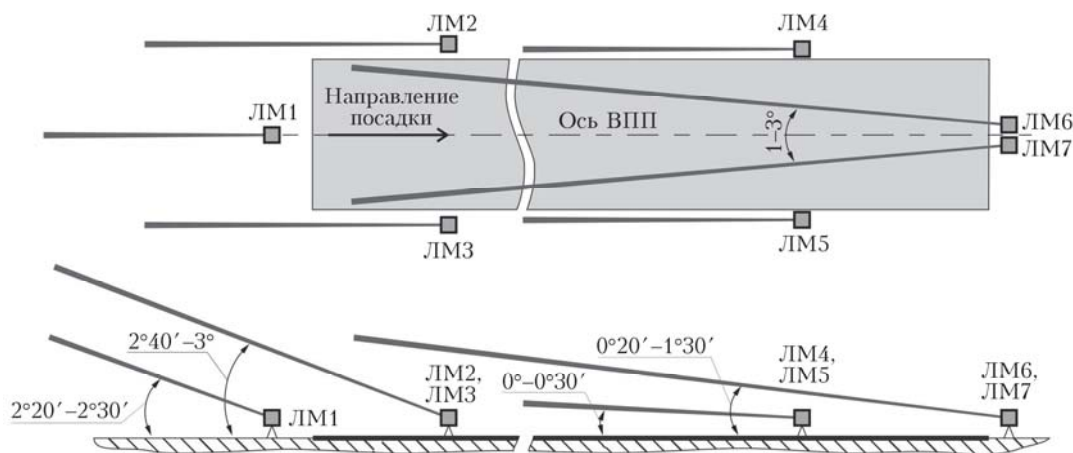


Рис. 1. Схема расположения ЛСП на ВПП

$\beta_{\text{гл}}$ — угол места луча индикации глассады, равный $2^{\circ}40' - 3^{\circ}$; $\beta_{\text{ос}}$ — угол места луча индикации оси ВПП, равный $0^{\circ}20' - 1^{\circ}30'$; $\beta_{\text{гр}}$ — угол места луча индикации боковых границ ВПП, равный $0 - 0^{\circ}30'$.

2. Метод решения задачи и исходные данные

2.1. Метод решения задачи

Задача видения сигнальных огней ВПП и огней приближения в различных метеоусловиях (МУ) имеет давнюю историю. Она относится к теории переноса излучения в приземном слое атмосферы и описывается интегро-дифференциальным уравнением переноса излучения (УПИ). Известно, что сложность решения УПИ в основном зависит от геометрии задачи и закономерности изменения характеристик среды. Трудности в решениях УПИ, как и любого интегрального уравнения, также зависят от ядра, которое здесь определяется индикатрисой рассеяния света элементарным объемом среды [11–13]. Кратко проанализируем некоторые приближения в решении УПИ применительно к оценке эффективности ЛСП по дальности.

В настоящее время считается, что для случая изотропного рассеяния теория переноса излучения достаточно хорошо разработана. Для случая анизотропного рассеяния, имеющего место в атмосфере, развиваются численные и приближенные методы решения УПИ. Среди численных наиболее развиты методы: характеристик, Монте-Карло и сферических гармоник. В работах [14–18] приводятся результаты расчетов видимости светосигнальных средств ВПП в тумане, выполненных методом Монте-Карло. Расчеты показывают, что первый визуальный контакт пилота с осевыми огнями ВПП при метеорологической дальности видимости (МДВ) $S_m = 400$ м устанавливается на удалении, равном 2 км. Однако эти методы численного моделирования являются весьма трудоемкими, кроме того, они мало применимы для выполнения расчетов в атмосферных дымках.

Основными приближениями, обеспечивающими аналитические решения УПИ для лазерных пучков, являются малоугловое, малоугловое диффузионное и диффузионное приближения [18–21]. Первые два в основном применяются для сред с сильно вытянутой индикатрисой рассеяния, таких как туманы или взвеси в воде. Однако в силу низкой эффективности оптических средств, в частности лазерных зрительных средств, работающих в дневных условиях при видении в тумане при $S_m < 500$ м, малоугловое приближение используется ограниченно. Результаты диффузионного приближения относятся к изотропным источникам и к средам со сферической индикатрисой рассеяния. В нашем случае имеется точечный мононаправленный лазерный источник, пучок излучения которого распространяется в анизотропной рассеивающей среде. В работе [21] предложено решение УПИ в малоугловой модификации метода сферических гармоник, которое было развито в [22] применительно для данной задачи.

Несмотря на современные достижения теории рассеяния, теории видения и имеющийся экспериментальный материал, при практическом решении задач, обозначенных в настоящей статье, используют приближенные методы, которые приводят к конечным формулам, удобным для анализа. В условиях слабомутной атмосферы при $S_m \geq 1$ км с достаточной степенью точности можно воспользоваться теорией однократного рассеяния света, когда учитывается только однократно рассеянный свет и не учитываются эффекты многократного рассеяния. В пользу этого говорит и то, что величина поправки в общую освещенность за счет кратно рассеянного излучения во многом зависит от оптической толщи τ и угла поля зрения приемника ν . При значении ν , равном нескольким градусам, величина поправки оказывается заметной уже при значениях $\tau \geq 1$ [23]. При ν , равном нескольким угловым минутам, что соответствует угловому размеру отдельного светочувствительного элемента сетчатки глаза, вклад кратного рассеяния учитывается начиная со значений $\tau = 15 - 23$. Поэтому при зрительном наблюдении линейных ориентиров ЛСП в условиях атмосферных дымков можно предположить, что в случае небольших оптических толщ изменение светового потока с приемлемой для практики точностью описывается однократным приближением в решении УПИ [23].

В общем виде расчет минимально необходимых мощностей излучения лазерных источников ЛСП сводился к расчету освещенности E , создаваемой рассеянным излучением каждого лазерного луча в отдельности на зрачке глаза наблюдателя, и сравнению полученного значения с расчетной величиной пороговой освещенности $E_{\text{п}}$ для конкретных условий обнаружения навигационного символа.

2.2. Атмосферно-оптические ситуации, принятые для расчета

Учитывая специфику применения ЛСП в реальных условиях, для проведения расчетов выбраны три наиболее характерных состояния приземного слоя континентальной атмосферы: дымка, туманная дымка и радиационный туман. Выбор тумана обусловлен требованием метеоминимума I категории ИКАО с видимостью 800 м. Для выбранных состояний атмосферы были взяты соответствующие индикатрисы рассеяния на основании данных работ для континентальных условий [13, 23] и наших данных для прибрежных условий [24–30], которые показаны на рис. 2.

2.3. Пороговые характеристики зрения

В качестве критерия обнаружения линейных ориентиров, создаваемых ЛСП, выбрана величина пороговой освещенности $E_{\text{п}}$ на зрачке глаза наблюдателя для соответствующего спектрального диапазона. Анализируя состояние и перспективы измерения дальности видимости огней, известные специалисты по проблеме видимости Забелина [31],

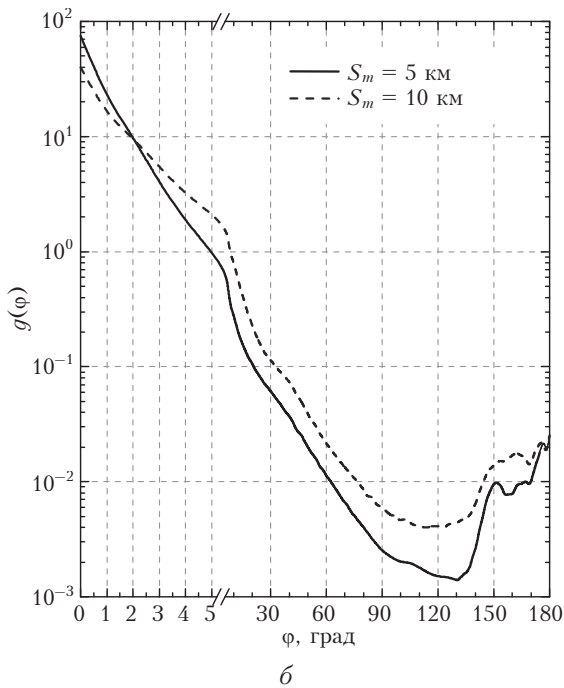
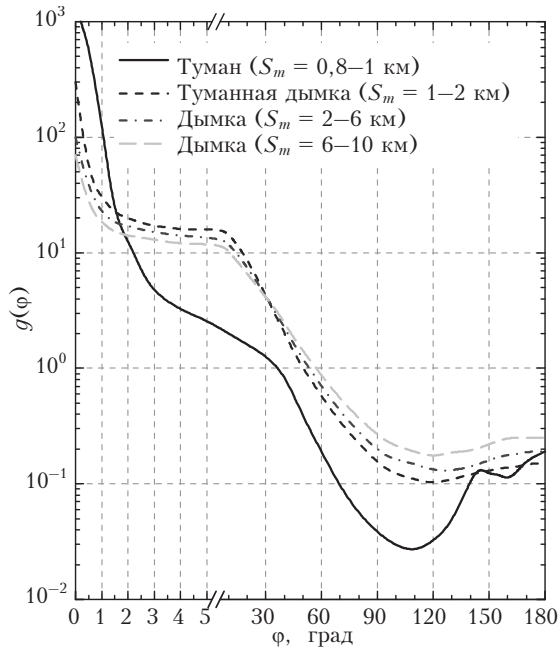


Рис. 2. Нормированные индикатрисы рассеяния $g(\varphi)$ на длине волны $\lambda = 0,55$ мкм для приземного слоя континентальной (а) и прибрежной (б) атмосферы для высоты 10 м при относительной влажности воздуха 80% для различных МДВ (S_m)

Мешков [32], Луизов [33], Ковалев [34], Басов [17] писали, что абсолютный порог у каждого человека непрерывно меняется со временем при любых условиях наблюдения, причем индивидуальные особенности наблюдателя и его состояние в момент наблюдения могут быть причиной значительных различий. В этом заключается один из основных источников больших затруднений и погрешностей в задаче видимости огней. В отличие от дневной видимости, где основная физиологическая характеристика зрительного аппарата — порог контрастной чувствительности глаза — является достаточно постоянной, здесь мы имеем дело с широко колеблющейся характеристикой — абсолютным порогом. Вследствие этого определение дальности видимости огней обречено на весьма малую точность.

В табл. 1 для ночных и сумеречных условий приведены ведомственные значения пороговой освещенности, принятые ИКАО [35, 36], в нормах по проектированию зрительных средств навигационного оборудования [37, 38] и в методиках НПК «Государственный оптический институт (ГОИ) им. С.И. Вавилова» [31, 39].

Проведенный анализ по порогам показывает, что для заданного спектрального интервала $\Delta\lambda = 0,52-0,64$ мкм пороги ИКАО являются нейтральными как для сумерек, так и для ночи, и в то же время наиболее жесткие, т.е. для обнаружения требуется большая величина рассеянного излучения. К ним близки пороговые значения, опубликованные в работах ГОИ, хотя при этом и составляют немного меньшие величины. Промежуточное положение по величинам порогов занимают данные Международной ассоциации маячных служб (МАМС) [37] и Управления навигации и океанографии (УНиО) МО РФ [38]. Это обусловлено выбором коэффициента запаса или надежности $K_{\text{зап}}$, величина которого может изменяться до полутора порядков в зависимости от ведомства и решаемых задач.

Согласно требованиям ИКАО считается, что визуальный контакт пилота с аэродромом устанавливается, когда он видит участок огней протяженностью не менее 150 м. При этом для благополучного завершения посадки необходимо, чтобы пилот самолета мог все время видеть несколько огней ВПП впереди себя. Как отмечено в [34], закономерности зрительного восприятия групповых огней до сих пор не изучены, хотя бы в той мере, в какой это необходимо для решения практических задач, связанных с метеорологическим обслуживанием авиации. Поэтому в расчетах регистрируемая мощность определялась как сумма мощностей от отдельных источников.

Таблица 1

Пороговая освещенность E_n для ночных и сумеречных условий наблюдения

Длина волны излучения λ , мкм	$E_n \cdot 10^{-7}$, лк							
	ИКАО [35, 36]		ГОИ [31, 39]		УНиО [38]		МАМС [37]	
	Ночь	Сумерки	Ночь	Сумерки	Ночь	Сумерки	Ночь	Сумерки
0,49–0,55	—	—	4,8	10	15	—	—	—
0,57–0,59	—	—	1,34	2,2	12	—	—	—
0,61–0,66	—	—	3,9	8	5	—	—	—
Белый источник	8	100	20	5	2	—	2	10

Главная особенность восприятия групповых огней заключается в том, что при значительном ухудшении видимости вокруг каждого огня возникают световые ореолы, существенно ухудшающие зрительную оценку направления светового пунктира, создаваемого этими огнями и указывающего экипажу положение ВПП. Иначе говоря, появление светового ореола вокруг огней приводит к своего рода демодуляции светового изображения, воспринимаемого глазом наблюдателя. Если при высокой прозрачности атмосферы группа огней зрительно воспринимается как некая периодическая структура с чередующимися максимумами и минимумами интенсивности света, то по мере ухудшения прозрачности и усиления ореолов различия интенсивностей в максимумах и минимумах будут уменьшаться. При этом, вследствие вуалирующего эффекта ореола, создаваемого ближними огнями, сглаживание интенсивностей для более удаленных огней будет происходить быстрее, чем для ближних. Этот эффект приводит к тому, что удаленные огни группы могут восприниматься глазом хуже, чем это следует из используемого в расчетах приближения однократного рассеяния.

Следующим важным обстоятельством является то, что при сильном ухудшении прозрачности атмосферы наступает момент, когда наблюдаемая группа огней высокой интенсивности будет восприниматься не в виде светового пунктира, а в виде некоторого размытого изображения, не дающего пилоту сколь-нибудь ясного представления о том, какие именно огни он в данный момент наблюдает. Таким образом, при восприятии групповых огней информативность восприятия этих огней может теряться раньше, чем освещенность на светочувствительной поверхности глаза достигает порогового значения освещенности $E_{п}$. Необходимо, конечно, иметь в виду, что все сказанное выше относится только к восприятию огней в плотных туманах, когда оптическая толщина слоя атмосферы между наблюдателем и наблюдаемыми огнями достигает 10 и более.

При выборе расчетных значений $E_{п}$ в зависимости только от яркости окружающего фона, как это делается на практике, не учитывается (да и невозможно учесть) целый ряд факторов, которые имеют место в реальных условиях полета. К таким

факторам относятся: ограниченность времени наблюдения светового сигнала; наличие большого количества посторонних огней в поле зрения пилота; наличие определенного сектора обзора, в котором следует ожидать появления сигналов; искажающее влияние защитных стекол штурманской или кабины пилота; психологическое напряжение пилота в момент посадки, физическое и нервное утомление и т.д. Все эти факторы компенсируются введением коэффициента $K_{зап}$, однако выбор численного значения его произволен и не отражает условий конкретной ситуации при посадке воздушного судна.

3. Расчет минимально необходимых мощностей излучения

С учетом вышеизложенного проведем расчет минимально необходимой мощности излучения каждого излучателя ЛСП в отдельности. Схематически взаимное расположение лазерного пучка и наблюдателя показана на рис. 3. Наблюдатель с углом поля зрения ν , расположенный в точке G на расстоянии L от источника S , видит лазерный пучок с расходимостью θ под углом φ .

Примем, что распределение интенсивности по сечению лазерного пучка равномерно, а расчет проведем аналитически в приближении однократного рассеяния. Это обусловлено тем, что база наблюдения L достаточно велика, а расходимость пучка и угол поля зрения малы, т.е. область интегрирования стягивается к небольшому объему их пересечения.

В месте приема рассеянное излучение от элементарного рассеивающего объема пучка создает энергетическую освещенность:

$$dE_e = \frac{P_0 \sigma(\lambda) g(\varphi) \cos(\gamma - \varphi)}{4\pi l_2^2} \exp(-\sigma(\lambda)(l_1 + l_2)) dl_1, \quad (1)$$

где P_0 – выходная мощность лазерного пучка; $\sigma(\lambda)$ – спектральный коэффициент аэрозольного ослабления; $g(\varphi)$ – коэффициент направленного светорассеяния; φ – угол рассеяния в сторону наблюдателя; γ – угол между линией наблюдения и осью пучка; l_1 – расстояние от ЛСП до точки наблюдения; l_2 – расстояние от точки визирования до наблюдателя.

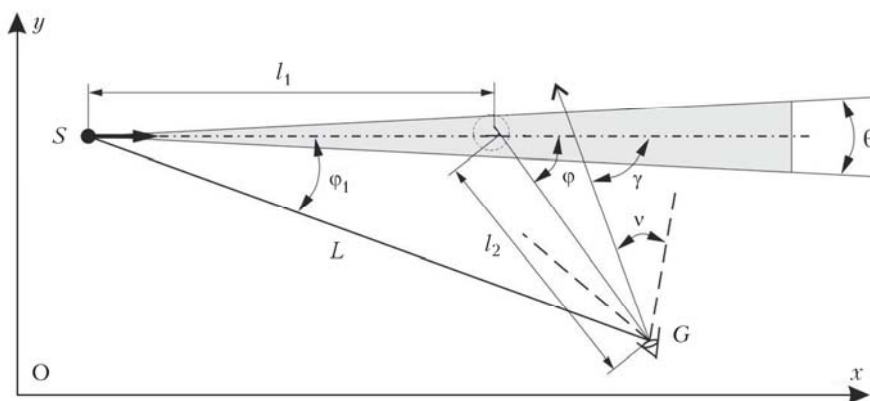


Рис. 3. Схема взаимного расположения лазерного пучка и наблюдателя

Учитывая, что $dl_1 = l_2 d\varphi / \sin(\varphi)$ и $l_2 = l_{2n} / \sin(\varphi)$, и одновременно выполнив приведение к световым величинам, для освещенности на зрачке глаза, создаваемой рассеянным излучением от всего пучка в пределах углов от φ_1 до $\pi/2$, можно записать:

$$E = \frac{P_0 K_{\max} V(\lambda) \sigma(\lambda)}{4\pi l_{2n}} \times \int_{\varphi_1}^{\pi/2} g(\varphi) \cos(\gamma - \varphi) \exp(-\sigma(\lambda)(l_1 + l_2)) d\varphi, \quad (2)$$

где

$$l_1 = L \left[\cos \varphi_1 - \left(\sqrt{1 - \cos^2 \varphi_1} / \tan \varphi \right) \right];$$

$$l_2 = L \sqrt{1 - \cos^2 \varphi_1} / \sin \varphi;$$

$\varphi_1 = \arctg(l_{2n}/l_{1n})$ — угол между направлением на источник и осью пучка; l_{1n} и l_{2n} — расстояния, равные соответственно расстояниям l_1 и l_2 , при наблюдении перпендикулярно оси пучка ($\gamma = 90^\circ$); K_{\max} — максимальная спектральная световая эффективность, равная 683 лм/Вт; $V(\lambda)$ — относительная спектральная световая эффективность для дневного зрения.

Минимально необходимая мощность излучения лазерного источника для обнаружения пучка под

углом $\varphi_{\max} = \varphi_1 + \Delta\varphi$, где $\Delta\varphi = 5^\circ$, рассчитывалась с помощью соотношения

$$P_{\min} \geq \frac{E_{\pi} 4\pi l_{2n} \exp[\sigma(\lambda)(l_1 + l_2)]}{K_{\max} V(\lambda) \sigma(\lambda) g(\varphi_{\max}) \sin(\varphi_{\max})}. \quad (3)$$

Дальнейший расчет осуществлялся с помощью программы Range [40–42] и сопутствующих программ [43–46], которые позволяют рассчитывать энергетическое ослабление излучения лазерных и традиционных источников света с учетом аэрозольного ослабления на трассах в приземном слое континентальной, морской и прибрежной атмосферы.

3.1. Геометрические схемы, принятые для расчетов

Для определения параметров L и φ_1 , входящих в выражение (3), в качестве исходных данных выбраны необходимая дистанция обнаружения до порога ВПП $L_0 = 1,0–1,6$ км и отклонение от глиссады и курса ΔD , равных 0–60 м и 0–15 м соответственно.

На рис. 4, 5 приведены иллюстрации взаимного положения летательного аппарата (ЛА) относительно ЛМ курсоглиссадной группы и группы для обозначений боковых границ и оси ВПП.

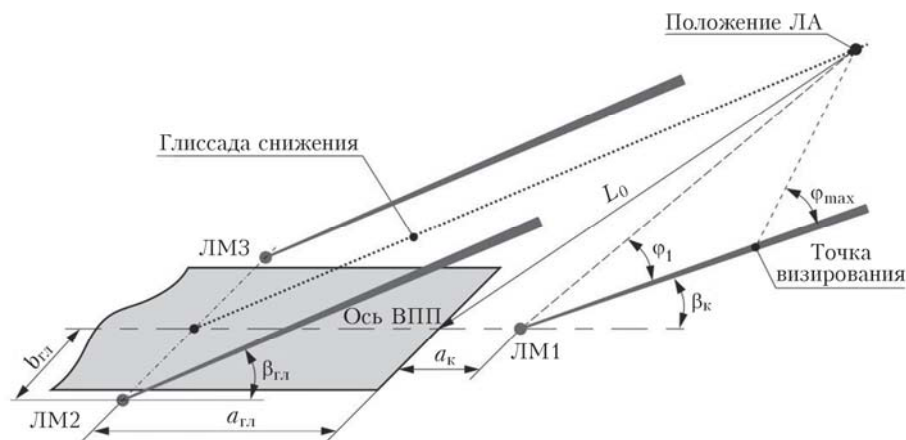


Рис. 4. Геометрия наблюдения курсоглиссадных лучей

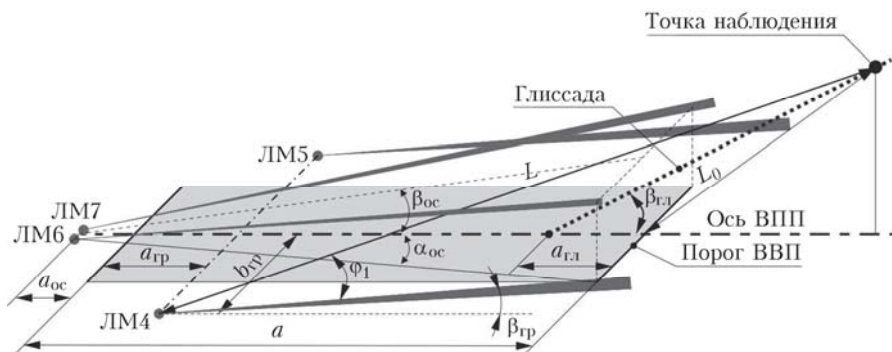


Рис. 5. Геометрия наблюдения лучей индикации боковых границ и оси ВПП

Для расчета L и ϕ_1 были получены следующие общие выражения:

$$L = \sqrt{L_{\text{тор}}^2 + C^2 \sin^2 \beta_{\text{гл}}}, \quad (4)$$

где $C = \left(\sqrt{L_0^2 - (X_p \sin \beta_{\text{гл}})^2} \right) + X_p \cos \beta_{\text{гл}}$, L_0 — расстояние от наблюдателя до порога ВПП, X_p — расстояние от порога ВПП до точки приземления, равное $a_{\text{гл}}$; $L_{\text{тор}} = \sqrt{(X_i + (C \cos \beta_{\text{гл}} - X_p))^2 + Y_i^2}$ — проекция луча i -го ЛМ до наблюдателя, X_i , Y_i — координаты размещения i -го ЛМ относительно порога и оси ВПП соответственно.

$$\phi_1 = \arccos\left(\frac{L_{\text{тор}} \cos \alpha_0}{L \cos \beta_0}\right) + \arctg\left(\frac{\Delta D}{L}\right), \quad (5)$$

где

$$\alpha_0 = \arcsin(Y_i/L_{\text{тор}}) + \alpha_i;$$

$$\beta_0 = \arcsin(C \sin \beta_{\text{гл}}/L_{\text{верт}}) - \beta_i;$$

$$\beta_0 = \arcsin(C \sin \beta_{\text{гл}}/L_{\text{верт}}) - \beta_i;$$

$$L_{\text{верт}} = \sqrt{(X_i + (C \cos \beta_{\text{гл}} - X_p))^2 + C^2 \sin^2 \beta_{\text{гл}}}$$

— высота до луча от наблюдателя; α_i , β_i — азимут и угол места i -го ЛМ соответственно.

В табл. 2 приведены результаты расчета параметров L и ϕ_1 по выражениям (4), (5) для каждого излучателя ЛСП на удалениях 1000 и 1600 м от порога ВПП при положении ЛА на глиссаде и по курсу. При заданных отклонениях от оптимальной

траектории снижения величина поправки в угол наблюдения может меняться в пределах $0,5-2^\circ$.

Таблица 2

Параметры геометрии наблюдения излучателей ЛСП

Лазерный маяк	Расстояние L , м		Угол ϕ_1 , град	
	$L_0 = 1000$ м	$L_0 = 1600$ м	$L_0 = 1000$ м	$L_0 = 1600$ м
ЛМ1	950	1550	2,88	2,79
ЛМ2, ЛМ3	1350	1950	3,83	3,28
ЛМ4, ЛМ5	3348	3948	1,32	1,30
ЛМ6, ЛМ7	4049	4648	1,64	1,71

3.2. Результаты расчетов для курсоглиссадной группы

На рис. 6–9 представлены расчетные минимальные мощности, достаточные для уверенного обнаружения линейных ориентиров курсоглиссадной группы ЛСП ночью и в сумерках в зависимости от отклонения от глиссады ΔD при различной метеорологической дальности видимости S_m для спектральных диапазонов $\lambda = 0,52-0,54$ мкм и $\lambda = 0,60-0,64$ мкм.

Результаты расчетов, приведенные на рис. 6–9, показывают, что в сумеречных условиях при яркости фонового излучения атмосферы, возникающей после захода Солнца в пасмурных условиях и равной $B_\phi = 0,5$ кд/м² ($2,04 \cdot 10^{-4}$ Вт/м²), и при значении угла ϕ между осью луча и направлением на источник из точки наблюдения, равном 1° , лучи посадочной системы ЛСП будут обнаруживаться с расстояний порядка метеорологической дальности видимости. Например, при $S_m \sim 800$ м $L \sim 800$ м.

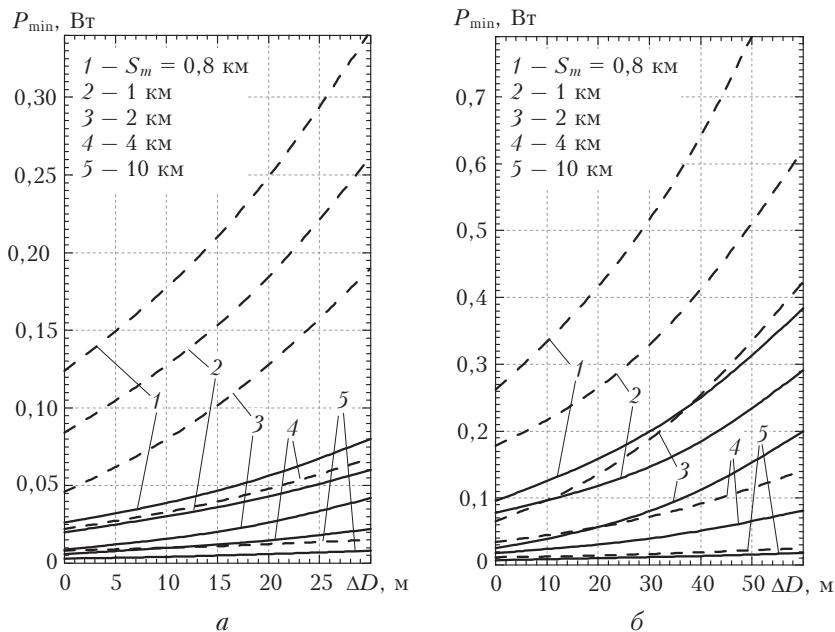


Рис. 6. Минимальная мощность P_{min} лазерных маяков индикации курса (сплошные линии) и глиссады (пунктирные линии) в спектральном диапазоне $\lambda = 0,52-0,54$ мкм при обнаружении ночью в зависимости от отклонения от глиссады ΔD на удалении от порога ВПП, равном: а — 1000 м; б — 1600 м

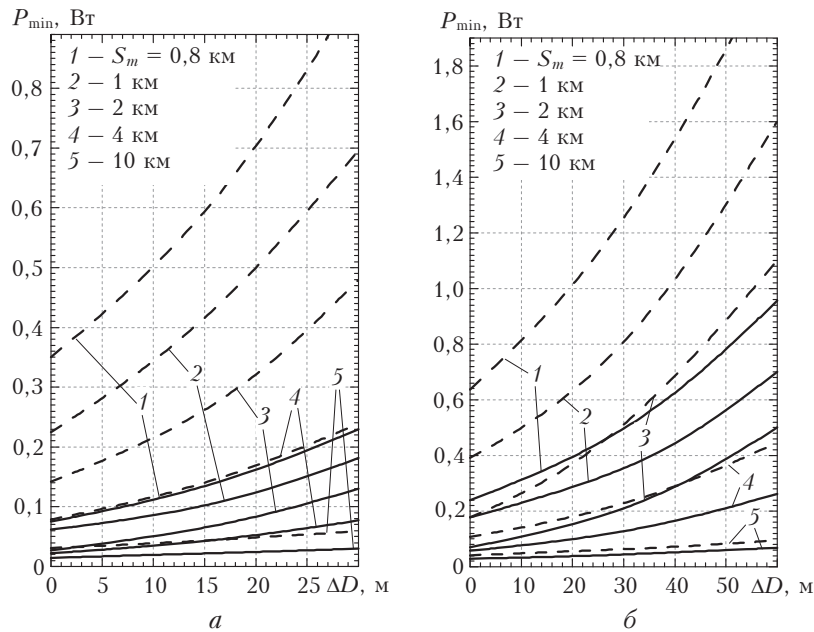


Рис. 7. Минимальная мощность P_{\min} лазерных маяков индикации курса (сплошные линии) и глиссады (пунктирные линии) в спектральном диапазоне $\lambda = 0,60-0,64$ мкм при обнаружении ночью в зависимости от уклонения от глиссады ΔD на удалении от порога ВПП, равном: $a - 1000$ м; $b - 1600$ м

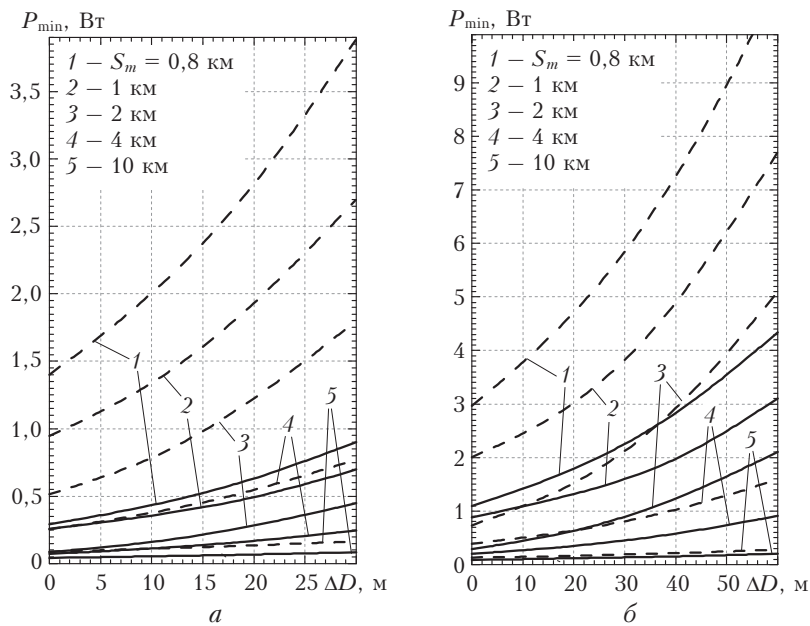


Рис. 8. Минимальная мощность P_{\min} лазерных маяков индикации курса (сплошные линии) и глиссады (пунктирные линии) в спектральном диапазоне $\lambda = 0,52-0,54$ мкм при обнаружении в сумерках в зависимости от уклонения от глиссады ΔD на удалении от порога ВПП, равном: $a - 1000$ м; $b - 1600$ м

В ночных условиях при отсутствии посторонних световых источников яркость фона, создаваемая рассеянным в атмосфере излучением, составляет $B_{\phi} = 10^{-3}$ кд/м² (10^{-8} Вт/м²), дальность обнаружения лучей ЛСП порядка $3,5S_m$. Однако в реальных ночных условиях в кабине пилота всегда присутствует фон, создаваемый освещением приборов, равный $0,1$ нт ($2,04 \cdot 10^{-4}$ Вт/м²). В этом случае дальность обнаружения лучей посадочной системы ЛСП составит $(2,5 - 3)S_m$.

Результаты расчетов, приведенные на рис. 6–9 для угла ϕ между осью луча и направлением на источник из точки наблюдения, равного 3° , показывают, что лучи ЛСП при $B_{\phi} = 10^{-3}$ кд/м² будут обнаруживаться с расстояний $L \sim (1,5 - 2)S_m$. При яркостях фона адаптации $B_{\phi} = 0,5$ кд/м² лучи не обнаруживаются для выбранных значений L и S_m .

При $\phi = 5^\circ$ и $B_{\phi} = 10^{-3}$ кд/м² из результатов расчета, приведенных в табл. 2, следует, что лучи ЛСП могут быть обнаружены с расстояний $(0,6 - 0,8)S_m$.

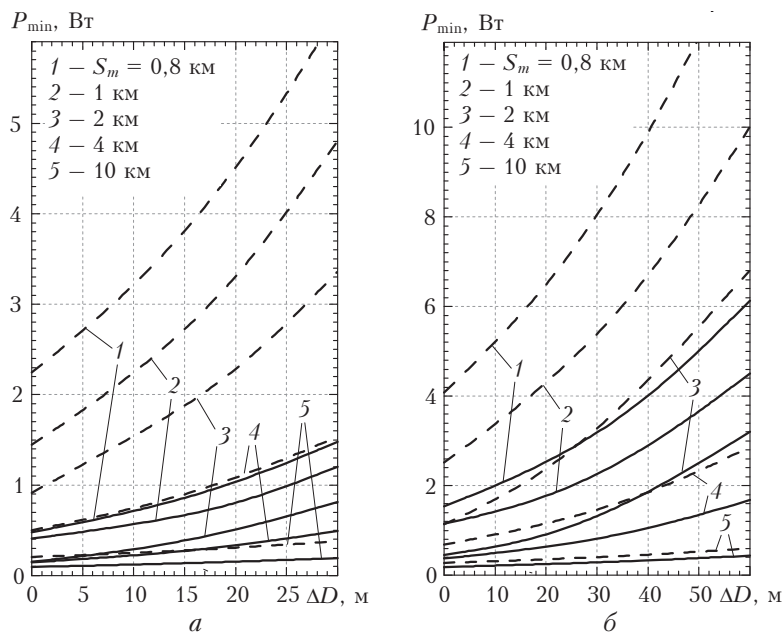


Рис. 9. Минимальная мощность P_{\min} лазерных маяков индикации курса (сплошные линии) и глissады (пунктирные линии) в спектральном диапазоне $\lambda = 0,60-0,64$ мкм при обнаружении в сумерках в зависимости от уклонения от глissады ΔD на удалении от порога ВПП, равном: $a - 1000$ м; $b - 1600$ м

При $B_{\phi} = 0,5$ кд/м² лучи не обнаруживаются при выбранных значениях L и S_m .

Таким образом, из результатов расчета следует, что:

1) при $\phi = 1^\circ$ в ночных условиях и $B_{\phi} = 10^{-3}$ кд/м² дальность обнаружения лучей ЛСП составляет $(2,5 - 3)S_m$;

2) при $\phi = 1^\circ$ в сумеречных условиях и $B_{\phi} = 0,5$ кд/м² дальность обнаружения лучей ЛСП составляет порядка S_m ;

3) при $\phi = 3^\circ$ в ночных условиях и $B_{\phi} = 10^{-3}$ кд/м² лучи ЛСП будут обнаруживаться с расстояний $L = (1,5 - 2)S_m$;

4) при $\phi = 5^\circ$ в ночных условиях и $B_{\phi} = 10^{-3}$ кд/м² лучи ЛСП будут обнаруживаться с расстояний $L = (0,9 - 1,9)S_m$;

5) увеличение угла ϕ между осью пучка и направлением на источник от 1° до 5° приводит к резкому уменьшению дальности обнаружения.

В результате расчеты показывают, что при $S_m = 800$ м лучи ЛСП будут надежно обнаруживаться ночью и в сумерках с расстояний $L = (1,2-1,6)$ км, что соответствует минимуму I категории ИКАО (высота принятия решения не менее 60 м при видимости не менее 800 м).

3.3. Результаты расчетов для лазерных пучков индикации боковых границ и оси ВПП

На рис. 10–11 приведены результаты расчета минимальной мощности лазерных излучателей индикации оси и боковых границ ВПП, полученные

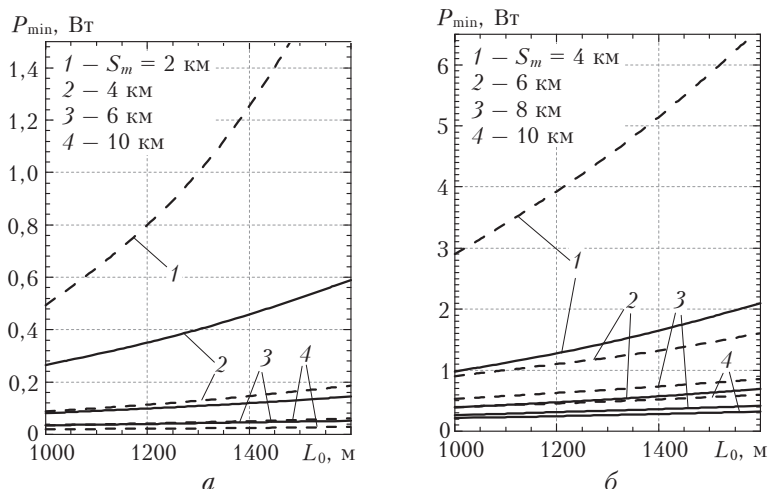


Рис. 10. Минимальная мощность P_{\min} лазерных маяков индикации оси (сплошные линии) и боковых границ (пунктирные линии) ВПП в спектральном диапазоне $\lambda = 0,52-0,54$ мкм в зависимости от удаления от порога ВПП L_0 при обнаружении: $a -$ ночью; $b -$ в сумерках

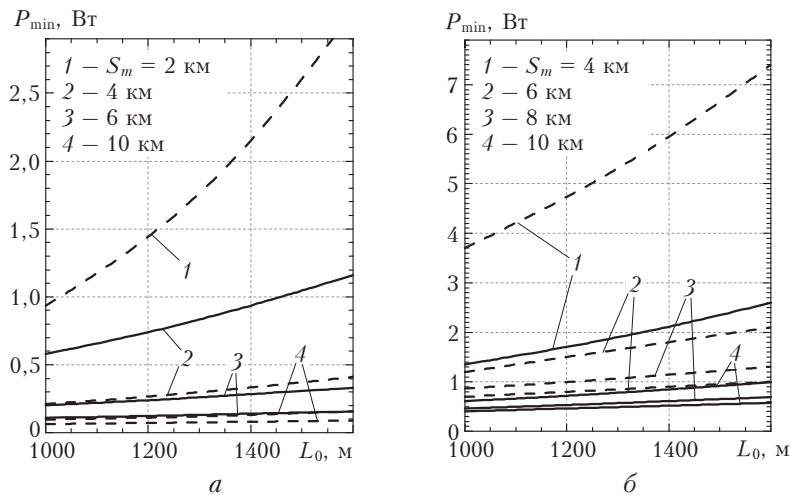


Рис. 11. Минимальная мощность P_{\min} лазерных маяков индикации оси (сплошные линии) и боковых границ (пунктирные линии) ВПП в спектральном диапазоне $\lambda = 0,60\text{--}0,64$ мкм в зависимости от удаления от порога ВПП L_0 при обнаружении: *a* – ночью; *б* – в сумерках

для различных условий видимости с расстояний, равных 1 и 1,6 км от торца ВПП, при изменении МДВ в пределах 2–10 км в ночных и сумеречных условиях в спектральном диапазоне $\lambda = 0,52\text{--}0,54$ мкм и $\lambda = 0,60\text{--}0,64$ мкм соответственно при положении самолета на глиссаде.

Таким образом, расчеты показывают, что в ночных условиях в спектральном диапазоне $\lambda = 0,52\text{--}0,54$ мкм при $S_m = 2$ км видны только лучи боковых границ ВПП с расстояния $L_0 = 1$ км при $P_{\min} = 0,5$ Вт. При меньших S_m лучи оси и границ ВПП не обнаруживаются. При $S_m = 4\text{--}10$ км лучи оси и границ ВПП будут надежно обнаруживаться с расстояний $L_0 = 1\text{--}1,6$ км. В сумерках лучи оси и границ ВПП обнаруживаются с расстояний $L = 1\text{--}1,6$ км при $S_m \geq 8$ км.

В ночных условиях в спектральном диапазоне $\lambda = 0,60\text{--}0,64$ мкм при $P_{\min} = 0,5$ Вт и $S_m = 4$ км видны только лучи границ ВПП. При $S_m = 6\text{--}10$ км лучи оси и границ ВПП будут надежно обнаруживаться с расстояний $L = 1\text{--}1,6$ км. В сумерках при $S_m = 8\text{--}10$ км границы ВПП будут видны, а ось нет.

Заключение

Результаты проведенных расчетов дают основания для следующих выводов.

1. Для ночных условий лучи курсоглиссадной группы ЛСП для заданной выходной мощности зеленых и красных лазеров $P_{\min} = 0,5$ Вт, видны при всех S_m с заданных дистанций ($L = 1,6$ км и менее) при нахождении самолета на глиссаде. Это соответствует требованиям I категории ИКАО.

2. В сумеречных условиях зеленые и красные лучи видны с дистанций $L = 1\text{--}1,2$ км для всех S_m . При $L = 1,6$ км лучи видны при $S_m \geq 2$ км. Это также соответствует требованиям I категории ИКАО.

3. В дневных условиях зеленые и красные лучи не видны.

4. Лазерные лучи с $P_{\min} = 0,5$ Вт, обозначающие боковые границы и ось ВПП, в ночных условиях

видны с удаления 1 км при S_m , равной 2 и 4 км для зеленых и красных лазеров соответственно. А в сумерках границы ВПП будут видны только при $S_m = 8\text{--}10$ км, а ось будет видна только для зеленого лазера при этих же МДВ.

Работа выполнена при финансовой поддержке Минобрнауки России (проект № 14.604.21.0042).

1. Зуев В.Е., Пересыткин В.И., Фадеев В.Я., Калашин Г.А., Константинов Р.С. Лазерные устройства для обеспечения судовождения. Новосибирск: Наука, 1985. 128 с.
2. Лазерная система посадки самолетов «Глиссада» // Квант. электрон. 1978. Т. 5, № 6. С. 1399.
3. NAVAIR Lakehurst. Aircraft Platform Interface Laboratory. URL: <http://www.navair.navy.mil/>
4. Improved Fresnel Lens Optical Landing System (FLOLS). URL: <http://www.tpub.com/content/aviation2/P-1211/P-12110022.htm>
5. Visual approach slope indicator. URL: http://en.wikipedia.org/wiki/Visual_Approach_Slope_Indicator
6. Precision approach path indicator. URL: https://en.wikipedia.org/wiki/Precision_approach_path_indicator
7. АО «НИИ «Полюс» им. М.Ф. Стельмаха». URL: <http://www.polyus.msk.ru/RU/mainieru.html>
8. Компания «Кантегир». URL: <http://kantegir.com/about/>
9. Группа «ЛАЗЕР-КОМПАКТ». URL: www.laser-compact.ru
10. Калашин Г.А., Шишкин С.А., Анисимов В.И., Жуков В.В. Дозиметрия лазерной визуальной системы посадки // Оптика атмосф. и океана. 2016. (В печати).
11. Перенос радиации в рассеивающих и поглощающих атмосферах. Стандартные методы расчета / Под ред. Ж. Ленобль. Л.: Гидрометеиздат, 1990. 264 с.
12. Тимофеев Ю.М., Васильев А.В. Теоретические основы атмосферной оптики. СПб.: Наука, 2003. 474 с.
13. Зуев В.Е., Креков Г.М. Оптические модели атмосферы. Л.: Гидрометеиздат, 1986. 256 с.
14. Дрофа А.С., Лящук С.М., Усачев А.Л. Исследование видимости светосигнальной картины аэродрома в тумане // Светотехника. 1986. № 6. С. 19–21.
15. Усачев А.Л. О яркости рассеянного света направленно-излучающих огней // Тр. Ин-та эксперим. метеорол. Госкомгидромета. 1985. № 38/121. С. 72–79.

16. Акульшина Л.Г., Пинчук С.Д. О видимости удаленного источника света в тумане и дымке // Тр. ин-та эксперим. метеорол. Госкомгидромета. 1986. № 40/123. С. 84–88.
17. Басов Ю.Г. Светосигнальные устройства. М.: Транспорт, 1993. 309 с.
18. Карасик В.Е., Мухина Е.Е., Орлов В.М. Оценка предельной дальности видимости маяков и пространственных ориентиров лазерной курсоглисадной системы в различных метеоусловиях // Инженерный журнал: наука и инновации. 2013. № 9 (21). С. 1–14. URL: <http://engjournal.ru/catalog/pribor/optica/913.html>
19. Зега Э.П., Иванов А.П., Кацев И.Л. Перенос изображения в рассеивающей среде. Минск: Наука и техника, 1985. 240 с.
20. Карасик В.Е., Орлов В.М. Локационные лазерные системы видения. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2013. 478 с.
21. Будаков В.П. Малоугловая теория диффузного светового поля в мутной среде: дис. ... докт. техн. наук. Москва, 1998. 275 с.
22. Budakov V.P., Kaloshin G.A., Shagalov O.V., Zheltov V.S. Numerical modeling of the radiative transfer in a turbid medium using the synthetic iteration // Opt. Express. 2015. V. 23, N 15. P. A829-A840.
23. Зуев В.Е., Кабанов М.В. Оптика атмосферного аэрозоля. Л.: Гидрометеоиздат, 1987. 255 с.
24. Кабанов М.В., Панченко М.В., Пхалагов Ю.А., Веретенников В.В., Ужегов В.Н., Фадеев В.Я. Оптические свойства прибрежных атмосферных дымок. Новосибирск: Наука. Сиб. отд-ние, 1988. 201 с.
25. Калошин Г.А., Шишкин С.А., Серов С.А. Расчет дальности видения световых сигналов навигационного комплекса со сканирующим полупроводниковым лазером с электронной накачкой. Ч. II. Аэрозольное ослабление и результаты расчетов // Оптика атмосф. и океана. 2007. Т. 20, № 4. С. 353–361.
26. Kaloshin G.A. Visible and infrared extinction of atmospheric aerosol in the marine and coastal environment // Appl. Opt. 2011. V. 50, N 14. P. 2124–2133.
27. Kaloshin G.A., Piazzola J., Shishkin S. Numerical modeling of influence of meteorological parameters on aerosol extinction in the marine atmospheric surface layer // Proc. 16th Int. Conf. on Nucleation and Atmospheric Aerosols (ICNAA). 23–28 June 2013. Colorado State University Fort Collins, CO, USA. P. 352–354. URL: <http://www.icnaa.org>
28. Alexeev A., Kaloshin G. Influence of microphysical characteristics volatility of aerosol on a spectral transparency in the surface boundary layer of the atmosphere // Proc. European Aerosol Conf. (EAC2003). Prague, Czech Republic. 1–6 September 2013. P. 40. URL: <http://eac2013.cz/>
29. Kaloshin G. Aerosol extinction in the marine atmospheric surface layer // Proc. 25th Anniversary Int. Geosci. and Remote Sens. Symp. (IGARSS). 2005. Seoul. 29–29 July 2005. P. 377–378. URL: <http://ieeexplore.ieee.org/xpl/articleDetails.jsp?reload=true&arnumber=1526082>
30. Kaloshin G.A., Grishin I.A. An aerosol model of the marine and coastal atmospheric surface layer // Atmosphere–Ocean. 2011. V. 49, N 2. P. 112–120.
31. Забелина И.А. Расчет видимости звезд и далеких огней. Л.: Машиностроение, 1973. 184 с.
32. Мешков В.В., Матвеев А.Б. Основы светотехники. Ч. 2. Физиологическая оптика и калориметрия. М.: Энергоатомиздат, 1989. 432 с.
33. Луизов А.В. Глаз и свет. Л.: Энергоатомиздат. Ленингр. отд-е, 1983. 144 с.
34. Ковалев В.А. Видимость в атмосфере и ее определение. Л.: Гидрометиздат, 1988. 216 с.
35. Руководство по проектированию аэродромов. Ч. 4. Визуальные средства. Doc9157 AN/901. 4-е изд. 2004 г. URL: <http://www.aerohelp.ru/data/432/Doc9157p4.pdf>
36. Руководящий документ: Руководство по определению дальности видимости на ВПП. РД 52.21.680–2006. 40 с. URL: <http://www.aviamettelecom.ru/docs/lib2/rd-2008.pdf>
37. The IALA Naviguide. 5th edition. 2006. URL: <http://www.puertoes.com/Documents/7-NAVGUIDE%202014%20not%20printable.pdf>
38. Инструкция по навигационному оборудованию (ИНО-2000). СПб.: ГУНиО МО РФ, 2001. 328 с.
39. Климух П.И., Забелина И.А., Гоголев В.А. Визуальные наблюдения и загрязнение оптики в космосе. Л.: Машиностроение. Лен. отд-е, 1983. 224 с.
40. Kaloshin G.A., Shishkin S.A. Detectable distance calculations for a visual navigation system using a scanning semiconductor laser with electronic pumping // Appl. Opt. 2011. V. 50, N 20. P. 3442–3448.
41. Программно-технологический пакет Range для проведения расчетов распространения оптического излучения с учетом аэрозольного ослабления в приземном слое континентальной, морской и прибрежной атмосферы: Св-во о гос. регистрации программы для ЭВМ № 2012616944 от 3.08.2012 г. / Г.А. Калошин, С.А. Шишкин.
42. Программа по расчету характеристик прямого и рассеянного излучения лазерной системы посадки: Св-во о гос. регистрации программы для ЭВМ № 2015611335 от 27.01.2015 г. / Г.А. Калошин, С.А. Шишкин, В.В. Жуков.
43. Калошин Г.А., Шишкин С.А., Серов С.А. Программный пакет MaexPro для расчета аэрозольного ослабления в приземном слое морской и прибрежной атмосферы // Оптич. ж. 2007. Т. 74, № 6. С. 20–27.
44. Калошин Г.А., Шишкин С.А., Серов С.А. Развитие программно-технологического пакета для расчета аэрозольного ослабления оптического излучения в приземном слое морской и прибрежной атмосферы // Оптика атмосф. и океана. 2008. Т. 21, № 2, С. 176–182.
45. Калошин Г.А., Шишкин С.А. Методические вопросы расчета дальности видимости новых светооптических систем зрительных СНО // Навигация и гидрография. 2004. № 18. С. 34–43.
46. Методика расчета контраста яркости лазерных систем посадки в сложных метеоусловиях: Св-во о гос. регистрации программы для ЭВМ № 2013619682 от 14.10.2013 г. / Г.А. Калошин, С.А. Шишкин.

G.A. Kaloshin, G.G. Matvienko, S.A. Shishkin, V.I. Anisimov, V.V. Butuzov, V.V. Zhukov, G.V. Stolyarov, V.P. Pasuk. **Potential of the aircraft landing laser system.**

The article presents the calculation results of the laser landing system efficiency (LLS) based on the definition of minimum required fluxes of scattered radiation from fixed extended pinpoints (FEPs), which are the LLS indicators at the visual detection of FEPs in the field conditions. It is shown that the minimal power $P_{\min} = 0.5$ W for $\lambda = 0.52$ μm and $\lambda = 0.64$ μm is required to reliably detect the laser beams of the course glide group at night from distances $L \approx 1.0$ – 1.6 km at $S_m = 800$ m for deviations from the glide path to the angle $\varphi = 0$ – 5° . In twilight conditions, the green and red laser beams are visible from the distance $L = 1$ – 1.2 km for all S_m . When $L = 1.6$ km laser beams are visible at $S_m > 2$ km. The presence of commercially available lasers and the calculations confirm the possibility of creation of the LLS based on a new generation of lasers that can ensure aircraft landing satisfying I Category ICAO.