

УДК 629.1.018.3

Дальность видимости светодиодных сигнальных огней взлетно-посадочной полосы

Г.А. Калошин¹, Г.Г. Матвиенко¹, С.А. Шишкин¹,
В.И. Анисимов², В.В. Бутузов², В.В. Жуков^{2*}

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

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

²Научно-исследовательский институт «Экран»

443022, г. Самара, пр. Кирова, 24

Поступила в редакцию 30.11.2015 г.

Приведены результаты расчетов силы света светодиодных огней (СДО), необходимых для уверенного визуального обнаружения огней взлетно-посадочной полосы (ВПП) в реальных условиях эксплуатации. Рассмотрены следующие варианты СДО ВПП: входные огни, посадочные огни последних 600 м ВПП и ограничительные огни. Выбраны пороговые уровни обнаружения. Приведен анализ эффективности СДО ВПП в различных метеосостояниях ночью, в сумерках и днем, а также рассмотрены вопросы ступенчатой регулировки силы света СДО в соответствии с нормами ИКАО.

Ключевые слова: аэрозольное ослабление, дальность видимости, перенос излучения, светодиодные огни, система посадки, программный пакет; aerosol extinction, visibility range, radiative transfer, light emitted diode (LED) lights, landing system, software package.

Введение

Применение светодиодов в светосигнальных системах в настоящее время является наиболее передовой технологией в зрительных средствах ориентирования и сигнализации транспортных средств. Энергоэффективность светодиодных огней (СДО) в 2 раза превышает энергоэффективность люминесцентных ламп и в 10 раз — ламп накаливания. Малое энергопотребление, высокая надежность, длительный срок службы, экологическая безопасность, отсутствие необходимости в регулярном обслуживании и антивандальные качества делают эти источники света весьма выигрышными по сравнению с традиционными лампами накаливания, люминесцентными и газоразрядными лампами.

Понимая перспективы развития светодиодных источников света, в авиации уделяют большое внимание внедрению их в светосигнальное оборудование аэропортов. В настоящее время в рамках совершенствования светотехнического оборудования аэродромов происходит глубокая модернизация имеющихся средств на взлетно-посадочной полосе (ВПП). Это позволяет осуществить успешную замену энергоемких

и трудоемких светотехнических сигнальных огней ВПП типа огней высокой интенсивности на светодиодные огни. При этом основной целью является повышение эффективности и надежности светосигнальных приборов, улучшение их светотехнических параметров (дальность видимости и различимость сигнальных показаний). Это ведет к повышению безопасности полетов, снижению эргономической и психофизиологической нагрузки на экипаж при выполнении ответственных этапов полета — взлета и посадки.

В статье приводятся результаты расчетов эффективности СДО ВПП ночью, в сумерках и днем в условиях плотных атмосферных дымок и тумана. При этом основное внимание было уделено оценкам минимально необходимой для зрительного обнаружения силы света СДО в реальных условиях эксплуатации.

1. Схема расположения и параметры СДО

Основой для расчета силы света СДО ВПП является схема, приведенная на рис. 1. СДО состоят из трех групп огней: входных зеленых (ALG), расположенных вдоль порога перпендикулярно оси ВПП; посадочных желтых (ALY), расположенных по обе стороны ВПП; ограничительных красных (ALR), расположенных вдоль границы ВПП перпендикулярно оси с противоположной от порога стороны ВПП. Параметры СДО приведены в табл. 1.

* Геннадий Александрович Калошин (gkaloshin@iao.ru); Геннадий Григорьевич Матвиенко (magg@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).

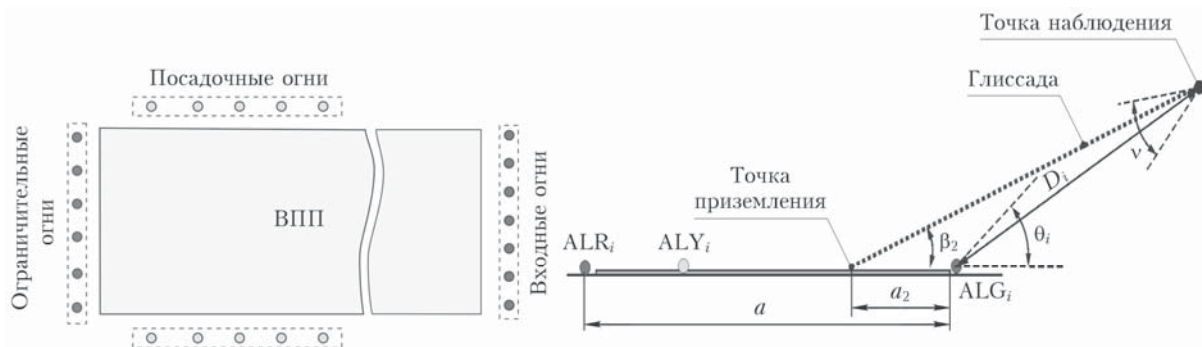


Рис. 1. Схема размещения СДО ВПП и геометрия наблюдения

Таблица 1
Параметры излучения СДО

Параметр	Группа СДО		
	ALG	ALY	ALR
Сила света, кд	10000	10000	2500
Длина волны, мкм	0,53	0,58	0,62
Тип излучения	Непрерывный		

2. Методика расчета освещенностей СДО

Вопросы зрительного восприятия традиционных сигнальных огней и методика расчета потоков прямого излучения достаточно подробно рассмотрены в литературе [1–6]. В данной статье расчет потребной силы света СДО проводился по схеме, аналогичной принятой в [3–5] для лазерных излучателей. Поскольку для сигнальных СДО, так же как и для лазерных источников, сохраняются величины, с помощью которых количественно описывается поле оптического излучения, а именно: световой поток, сила света и освещенность, то считается [7], что для задач зрительного обнаружения огней светодиоды являются классическими излучателями некогерентного излучения с узким спектром излучения.

Минимально необходимая для уверенного зрительного обнаружения сила света I определяется следующими величинами: метеорологической дальностью видимости S_m , яркостью фона адаптации глаза наблюдателя L_ϕ , длиной волны излучения λ , пороговым блеском E_n , расстоянием обнаружения СДО D . Таким образом, следует находить функциональную зависимость

$$I = f(S_m, L_\phi, \lambda, E_n, D). \quad (1)$$

Необходимые значения D приняты равными 1,0–1,6 км при значениях $S_m = 0,8–10$ км. Условия наблюдения: сумерки – $L_\phi = 10^{-2}–10$ кд/м²; ночь – $L_\phi = 10^{-4}–10^{-2}$ кд/м²; день – $L_\phi = 10–10^3$ кд/м².

В общем случае расчет освещенности СДО, необходимой для уверенного обнаружения, сводился к следующему:

1) осуществлялось задание значений энергетических характеристик СДО, S_m , пороговых характеристик зрения и геометрии схемы размещения СДО и наблюдателя;

2) для огня каждой группы СДО рассчитывалась I при различных энергетических и спектральных характеристиках СДО и условий видимости. Регистрируемая I рассчитывалась в приближении однократного рассеяния уравнения переноса излучения.

В качестве рассеивающей среды были выбраны: континентальная атмосфера, характеризующаяся величиной метеорологической дальности видимости S_m и морская и прибрежная атмосфера, характеризующаяся скоростью и направлением ветра, разгоном волн, относительной влажностью, высотой, спектральным диапазоном излучения и спектром размеров частиц, которые являлись входными параметрами для подпрограммы «MaexPro» [8–13]. Результатом вычислений являлся спектральный коэффициент аэрозольного ослабления $\sigma(\lambda)$ и индикатриса рассеяния $x(\phi)$.

Дальнейший расчет осуществлялся с помощью программы «Range» [14–16] и сопутствующих программ [17–19], которые позволяют рассчитывать энергетическое ослабление излучения лазерных, светодиодных и «традиционных» источников света с учетом аэрозольного ослабления на трассах в приземном слое континентальной, морской и прибрежной атмосферы [20–25].

В качестве пороговых характеристик зрения для ночных и сумеречных условий наблюдения в статье были приняты нормативные данные, используемые при проектировании зрительных средств навигационного оборудования ИКАО [26], с учетом отечественных норм, принятых в ГОИ [27, 28], рекомендаций УНПО МО РФ и МАМС [29, 30].

Расчет минимально необходимой для уверенного зрительного обнаружения силы света I для огня соответствующей светодиодной группы в зависимости от метеорологической дальности видимости S_m осуществлялся в приближении однократного рассеяния по выражению

$$I = kE_n K_m V(\lambda) D^2 \exp(3,92D/S_m) \times \left[1 + \frac{3,92D}{S_m} \int_0^{\pi/2} x(\phi) d\phi \right]^{-1}, \quad (2)$$

где k – коэффициент запаса, равный 50 [1]; E_n – пороговая освещенность для соответствующих условий наблюдения, Вт/м²; K_m , $V(\lambda)$ – максимальная спектральная световая эффективность зрения

и относительная спектральная световая эффективность зрения соответственно, выбранные для заданных условий наблюдения; D – расстояние между СДО и наблюдателем, м; S_m – метеорологическая дальность видимости, м; $x(\varphi)$ – индикатриса рассеяния.

3. Результаты расчетов

3.1. Входные СДО

На рис. 2 приведены результаты расчетов силы света входных огней (зеленых) СДО на удалениях $D = 1$ и $1,6$ км для разных S_m и фоновых условий наблюдения. Приведенные результаты позволяют учитывать большие различия по L_ϕ и, таким образом, определять требуемые значения минимальной силы света огней, охватывая три широкие категории дневных, сумеречных и ночных условий наблюдения.

Анализ результатов, приведенных на рис. 2, показывает, что сила света для входных СДО, равная 10000 кд, является достаточной для заданных расстояний для всех условий наблюдения, кроме дневных при $S_m = 0,8$ км и $D = 1,6$ км. При этом для ночных и сумеречных условий наблюдения заданная сила света является избыточной.

3.2. Посадочные СДО

На рис. 3 приведены результаты расчета силы света посадочных огней (желтых) СДО на удалениях $D = 1$ и $1,6$ км при разных S_m и фоновых условиях наблюдения.

Анализ рис. 3 показывает, что сила света для посадочных СДО, равная 10000 кд, является достаточной для заданных D для всех условий наблюдения, кроме дневных при $S_m = 0,8$ км и $D = 1,6$ км, а для ночных и сумеречных условий наблюдения заданная сила света является избыточной.

3.3. Ограничительные СДО

На рис. 4 приведены результаты расчета силы света ограничительных красных СДО на удалениях $D = 1$ и $1,6$ км при разных S_m и фоновых условиях наблюдения.

Анализ рис. 4 показывает, что сила света для ограничительных СДО, равная 2500 кд, является избыточной для ночных и сумеречных условий наблюдения на заданных D . В дневных же условиях при $S_m \leq 2$ км осевая сила света ограничительных СДО является недостаточной.

4. Обсуждение результатов

Проведенные расчеты позволяют сформулировать следующие основные выводы и рекомендации по силе света светодиодных излучателей и ее ступенчатой регулировке в соответствии с нормами ИКАО.

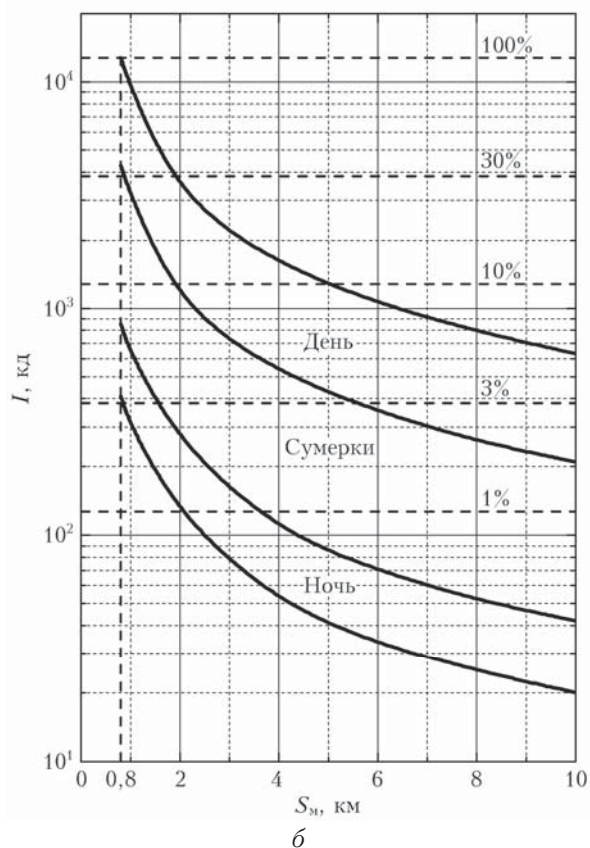
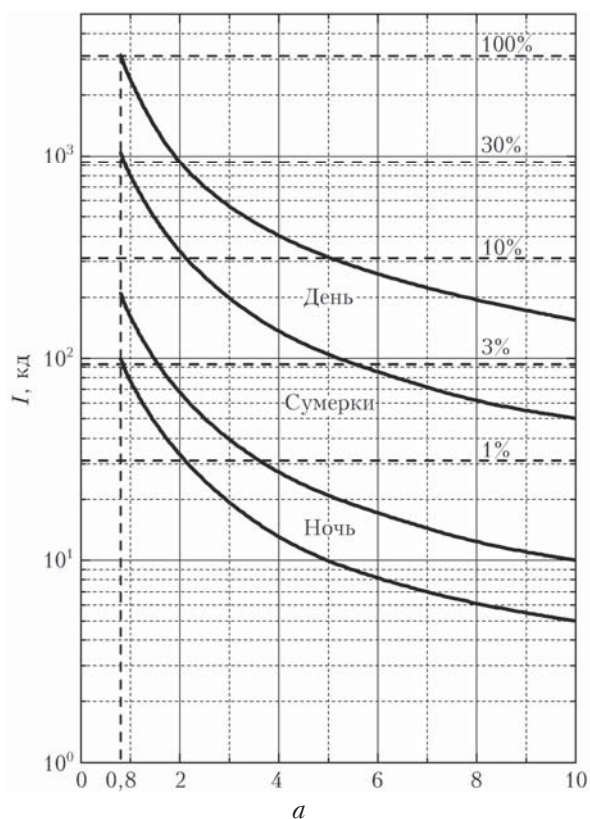


Рис. 2. Зависимость силы света I входных зеленых СДО от метеорологической дальности видимости S_m при разных условиях наблюдений для расстояний D , равных 1 (а) и $1,6$ км (б)

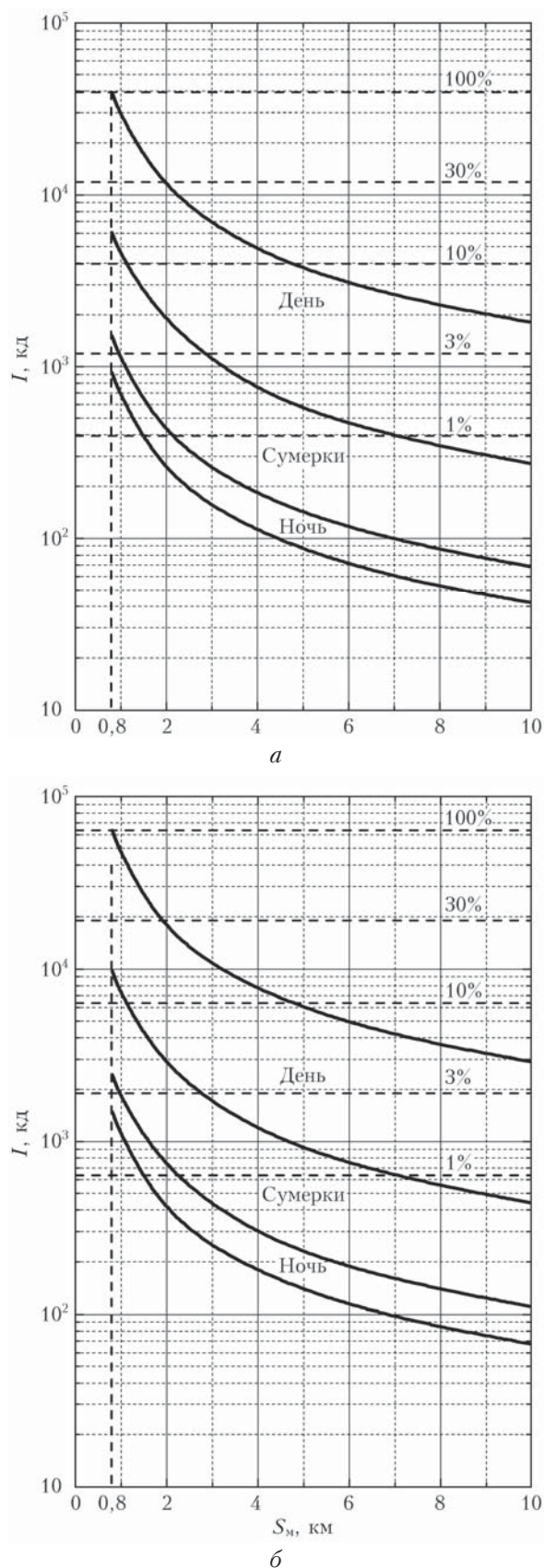


Рис. 3. Зависимость силы света I посадочных желтых СДО от S_m при разных условиях наблюдений для расстояний D , равных 1 (а) и 1,6 км (б)

Расчетные данные, приведенные на рис. 2–4, дают возможность учитывать большие различия в величинах яркости фона и, таким образом, определять требуемые значения силы света огней, охватывая три широкие категории дневных, сумеречных и ночных условий наблюдения. На них четыре кривые разграничивают три диапазона, определяющие дневные, сумеречные и ночные условия. Самая верхняя кривая (день) относится к яркости фона порядка 10000 кд/м^2 и соответствующей пороговой освещенности. Следующая кривая (граница между дневным временем суток и сумерками) соответствует яркости фона порядка 1000 кд/м^2 . Третья кривая (граница между сумерками и ночным временем суток) относится к яркости фона порядка 1 кд/м^2 , а самая нижняя кривая соответствует яркости фона порядка 10^{-2} кд/м^2 (темная ночь).

Для рис. 2–4 характерно следующее:

- все кривые имеют один и тот же условный наклон, а это означает, что потребная минимальная сила света при дальности видимости, равной 10 км, составляет $1/30$ силы света, требующейся при нулевой видимости. Следовательно, для любого огня при любых известных условиях можно вычертить три кривые, если известна соответствующая потребная сила света при нулевой видимости. Таким образом, на практике кривая границы экстремальных условий в дневное время суток заканчивается не в точке нулевой видимости, а в точке, где дальность видимости равна 1,5 км, но наклон кривых соответствует общему случаю;

- вертикальный интервал между кривыми (ширина диапазонов для дневного времени, сумерек и ночного времени на рисунках) есть величина, постоянная для всех типов огней в пределах данного диапазона. Поэтому диапазон дневного времени приблизительно в 1,5 раза превышает ширину диапазона ночного времени; диапазон сумерек в 2 раза больше ширины диапазона дневного времени;

- в реальных условиях эксплуатации наблюдаются одновременно огни приближения и огни ВПП, причем яркие огни кажутся более близкими. Поэтому для правильной оценки пилотом высоты и расстояния при выполнении захода на посадку важную роль играет правильная сбалансированность силы света СДО, которая обеспечивается ступенчатой регулировкой в соответствии с нормами ИКАО. Для всех групп СДО предусмотрено пять ступеней регулировки в соотношении 1:3, а именно: 100, 30, 10, 3 и 1% от номинального значения силы света. На рис. 2–4 справа приведены ступени регулировки в виде шкалы установочных значений силы света огней.

Такое соотношение выбрано, исходя из особенностей зрительного восприятия и его адаптации к изменению яркости. Известно, что связь между световым стимулом и ощущением определяется законом Вебера–Фенера и является логарифмической зависимостью [1]. Чтобы глаз мог заметно ощутить разницу, например, по яркости огней в два раза, соотношение в силе света должно быть примерно равно 1:3.

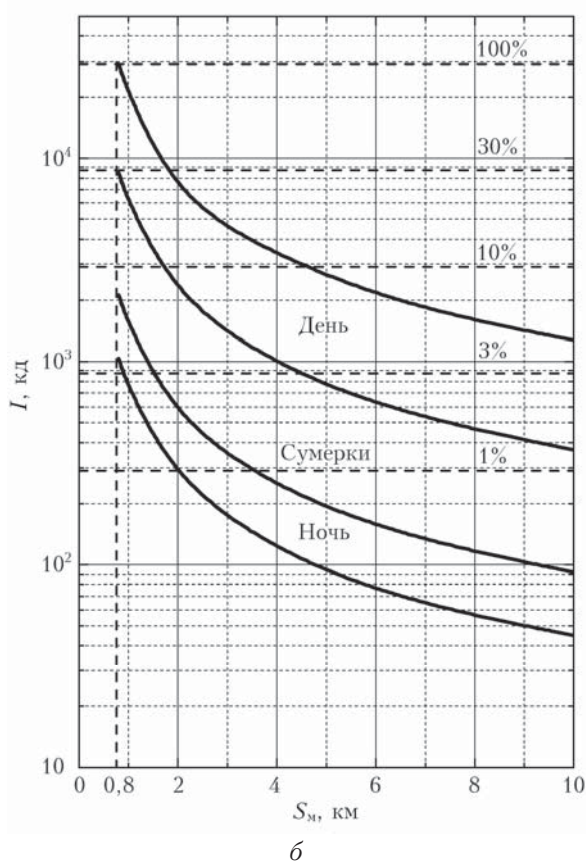
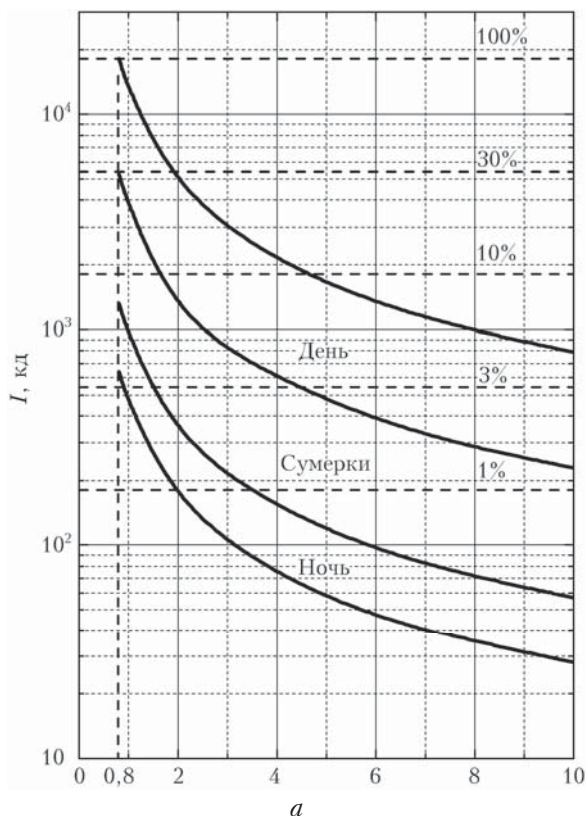


Рис. 4. Зависимость силы света I красных ограничительных СДО от S_m при разных условиях наблюдений для расстояний D , равных 1 (а) и 1,6 км (б)

На основании проведенных расчетов в зависимости от условий видимости на ВПП рекомендуется устанавливать ступени силы света СДО в соответствии со значениями, указанными в табл. 2. В дневных условиях такая регулировка не потребуется.

Таблица 2

Рекомендуемая сила света СДО для различных условий видимости в процентах от номинальных значений для всех групп огней

S_m , км	Ступени силы света СДО, %		
	Ночь	Сумерки	День
6÷4	1	3	10
4÷2	1	10	30
2÷1	3	30	30
менее 1	10	30	100

Заключение

1. Сила света, равная 10000 кд, для входных (зеленых) и посадочных (желтых) СДО является достаточной для заданных расстояний от порога ВПП во всех условиях наблюдения, кроме дневных условий при $S_m = 0,8$ км и расстоянии $D = 1,6$ км. При этом для ночных и сумеречных условий наблюдения заданная сила света является избыточной.

2. Для ограничительных (красных) СДО сила света, равная 2500 кд, является избыточной для ночных и сумеречных условий наблюдения на заданных расстояниях от порога ВПП. В дневных же условиях при $S_m \leq 2$ км осевая сила света ограничительных СДО является недостаточной.

3. Для входных, посадочных и ограничительных СДО в ночных и сумеречных условиях наблюдения существует необходимость в ступенчатой регулировке силы света, в дневных условиях такая регулировка не требуется.

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

1. *Забелина И.А.* Расчет видимости звезд и далеких огней. Л.: Машиностроение, 1973. 184 с.
2. *Калошин Г.А., Шишкин С.А.* О видимости групповых сигнальных огней ВПП в рассеивающей атмосфере // *Материалы XVIII Междунар. симп. «Оптика атмосферы и океана. Физика атмосферы».* Томск, июль, 2012. Томск: Изд-во ИОА СО РАН, 2012 С. В187–В192.
3. *Калошин Г.А., Матвиенко Г.Г., Шишкин С.А., Анисимов В.И., Бутузов В.В., Жуков В.В., Столяров Г.В., Пасюк В.П.* Потенциал лазерной системы посадки самолетов // *Оптика атмосф. и океана.* 2016. Т. 29, № 3. С. 232–242.
4. *Калошин Г.А., Шишкин С.А.* Расчет дальности видения световых сигналов навигационного комплекса со сканирующим полупроводниковым лазером с электронной накачкой. Ч. I. Аэрозольное ослабление и результаты расчетов // *Оптика атмосф. и океана.* 2007. Т. 20, № 4. С. 353–362.
5. *Калошин Г.А., Шишкин С.А.* Расчет дальности видения световых сигналов навигационного комплекса со сканирующим полупроводниковым лазером с электронной накачкой. Ч. II. Энергетические параметры источника и пороговые характеристики зрения // *Оптика атмосф. и океана.* 2007. Т. 20, № 3. С. 286–290.

6. Зуев В.Е., Пересыткин В.И., Фадеев В.Я., Калошин Г.А., Константинов Р.С. Лазерные устройства для обеспечения судовождения. Новосибирск: Наука, 1985. 128 с.
7. Shubert E.F. Light-emitting diodes. N.Y.: Cambridge University Press, 2003. 313 p.
8. Kaloshin G.A., Matvienko G.G. Aerosol microphysical model of the marine and coastal atmosphere surface layer for calculation of extinction in visible and IR radiation wave band // Proc. 5th Asian Aerosol Conf. Kaohsiung, Taiwan, August 2007. P. 1121–1123.
9. Kaloshin G.A., Matvienko G.G. Aerosol model development for environmental monitoring in the coastal atmosphere surface layer // Proc. Int. Conf. on Lasers, Applications, and Technologies (ICONO/LAT 2007). Minsk, Belarus, May 28 – June 1, 2007. P. 51.
10. Piazzola J., Kaloshin G. Performance evaluation of the coastal aerosol extinction code “MEDEX” with data from the Black Sea // J. Aerosol Sci. 2005. V. 36, N 3. P. 341–359.
11. Kaloshin G.A., Grishin I.A. An aerosol model of the marine and coastal atmospheric surface layer // Atmos.–Ocean. 2011. V. 49, N 2. P. 112–120.
12. Kaloshin G.A., Piazzola J. Influence of the large aerosol particles on the infrared propagation in coastal areas // Proc. 23rd Int. Laser Radar Conf., Nara City, Japan, July 24–28, 2006. P. 429–432.
13. Калошин Г.А. Влияние ветрового режима на аэрозольное ослабление в приземном слое морской и прибрежной атмосферы // Оптика атмосф. и океана. 2007. Т. 20, № 7. С. 571–576.
14. 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 программ для ЭВМ № 2012616944 от 03.08.2012 г. / Калошин Г.А., Шишкин С.А.
15. Программа по расчету характеристик прямого и рассеянного излучения светодиодной системы посадки: Св-во о гос. регистрации программ для ЭВМ № 2015611528 от 30.01.2015 г. / Калошин Г.А., Шишкин С.А., Жуков В.В.
16. Методика расчета фотометрических характеристик аэродромных светодиодных систем посадки: Св-во о гос. регистрации программ для ЭВМ № 2013619686 от 14.10.2013 г. / Калошин Г.А., Шишкин С.А.
17. 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.
18. Программа для расчета спектральных коэффициентов аэрозольного ослабления в приземном слое морской и прибрежной атмосферы MaexPro: Св-во о гос. регистрации программы для ЭВМ № 2012616945 от 3.08.2012 г. / Калошин Г.А., Шишкин С.А.
19. Программа для расчета комплексных показателей преломления вещества частиц морского и прибрежного аэрозоля MieCalc: Св-во о гос. регистрации программ для ЭВМ № 2012616943 от 3.08.2012 г. / Калошин Г.А., Шишкин С.А.
20. 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). Kyoto, Japan, July 26–30. 2004. P. 352–354.
21. Alexeev A., Kaloshin G.A. Influence of microphysical characteristics volatility of aerosol on a spectral transparency in the surface boundary layer of the atmosphere // Proc. European Aerosol Conf. (EAC2003). Madrid, Spain, 31 August – 5 September, 2003. P. 40.
22. Kaloshin G. Spectral transparency of the sea and coastal atmosphere surface layer // Proc. 23rd Int. Laser Radar Conf. Nara City, Japan, July 24–28, 2006. P. 427–428.
23. Kaloshin G. Aerosol extinction in the marine atmospheric surface layer // Proc. 25th Anniversary of Int. Geoscience and Remote Sensing Sympos. (IGARSS). Seoul, July 5, 2005. P. 377–378.
24. Kaloshin G. Influence of meteorological parameters on aerosol extinction in the marine environment // Proc. Int. Conf. on Coherent and Nonlinear Optics ICONO/LAT. St. Petersburg, Russia, May 11–15, 2005. P. 33–35.
25. 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.
26. Руководство по проектированию аэродромов. Ч. 4. Визуальные средства. Doc9157 AN/901. 4-е изд., июль 2004 г. URL: <http://www.aerohelp.ru/data/432/Doc9157p4.pdf>
27. Луизов А.В. Глаз и свет. Л.: Энергоатомиздат, Ленингр. отд-е, 1983. 144 с.
28. Климук П.И., Забелина И.А., Гоголев В.А. Визуальные наблюдения и загрязнение оптики в космосе. Л.: Машиностроение, Ленингр. отд-е, 1983. 224 с.
29. The IALA Naviguide. 5th edition. 2006. URL: <http://www.puertoes/Documents/7-NAVGUIDE%202014%20not%20printable.pdf>
30. Инструкция по навигационному оборудованию (ИНО-2000). СПб.: УНИО МО РФ, 2001. 328 с.

G.A. Kaloshin, G.G. Matvienko, S.A. Shishkin, V.I. Anisimov, V.V. Butuzov, V.V. Zhukov. **Visibility range of LED signals at runways.**

The calculations results of LED light intensity necessary for reliable visual detection of runway lights in field conditions are presented. The following groups of LED lights are considered: approach threshold lights, lights of the last 600 m of a runway, and runway end lights. Detection threshold were chosen. The effectiveness of LED lights is analyzed in different weather conditions during the night, at twilight, and in the day time, and questions of speed adjustment of LED radiation intensities in accordance with ICAO standards are considered.