

Мальва Мурашова | murma@mail.ru | Сергей Никифоров | sergnik71@mail.ru | Алексей Шищенко | lelikmma@mail.ru

Исследование фотобиологической опасности светодиодных осветительных приборов

для нужд железнодорожного транспорта

В последнее время полупроводниковые источники света (светоизлучающие диоды повышенной яркости) получают все большее распространение в разных областях светотехники. Их глубокое проникновение на рынок и быстро расширяющийся диапазон применений высокоярких и слепящих осветительных приборов (ОП) на основе светоизлучающих диодов (СД) привели к необходимости задуматься об уровне безопасности их излучения.

Вред для глаз от излучения СД состоит в возможном термическом или фотохимическом повреждении сетчатки. Опасности оптического излучения (ОИ) оцениваются в соответствии с руководящими указаниями Международной комиссии по защите от неионизирующих излучений (МКЗНИ, ICNIRP), в которых устанавливаются пределы времени воздействия (экспозиции) и рассматриваются вопросы оценки опасностей ОИ для глаз и кожи, раздельно для лазеров и для некогерентных широкополосных источников оптического излучения (ИИ). Эти пределы были положены в основу соответствующей директивы Европейского Союза (ЕС) [1].

Международная комиссия по освещению (МКО, CIE) (Отделение 6) совместно с Международной электротехнической комиссией (МЭК, IEC) разработала для ламп методы оценки и классификации рисков со стороны синего и ИК-излучений. Эти методы приведены в стандарте МКО/CIE S009 [2], затем принятого МЭК в качестве стандарта IEC 62471 [3].

Так как конкретное использование ИИ обычно заранее неизвестно, стандарты по безопасности продукции требуют определения некоторых радиометрических параметров для сравнения их с допустимыми пределами [4]. Эти пределы соответствуют одному из классов опасности (или группе риска), каждый из которых отражает традиционную философию безопасности. В этих стандартах указываются и необходимые условия измерения этих параметров, основанные на учете наиболее тяжелых условий экспозиции. Масштабное внедрение светодиодной техники на объектах железнодорожного транспорта, проводимое в настоящее время, стало возможным лишь после внесения Роспотребнадзором изменений и дополнений, разрешающих использование светодиодного освещения на объектах железнодорожного транспорта, в следующие Санитарные правила:

- «Санитарные правила по проектированию, размещению и эксплуатации депо по ремонту подвижного состава железнодорожного транспорта» СП 2.5.1334-03;
- «Санитарные правила по проектированию, изготовлению и реконструкции локомотивов и специального подвижного состава железнодорожного транспорта» СП 2.5.1336-03;
- «Санитарные правила для формирований железнодорожного транспорта специального назначения» СП 2.5.1335-03;
- «Санитарные правила по организации грузовых перевозок на железнодорожном транспорте» СП 2.5.1250-03.

В то же время применение светодиодов для освещения кабин машинистов и рабочих мест диспетчеров-операторов, связанных с обеспечением безопасности движения, Главным санитарным врачом ОАО «РЖД» не разрешено. Для решения вопроса о возможности получения такого разрешения необходимы исследования, подтверждающие фотобиологическую и гигиеническую безопасность длительного воздействия излучения светодиодов на организм человека при выполнении трудовых обязанностей специалистов водительских (машинистов и помощников машинистов) и диспетчерских профессий.

Данная статья посвящена исследованию фотобиологической опасности светодиодных осветительных приборов, предназначенных для использования при освещении кабин подвижного состава и помещений диспетчерских систем железнодорожного транспорта. Настоящие исследования проводились в России впервые и выполнялись по заданию Департаментов Управления охраны труда, промышленной безопасности и экологического контроля и Технической политики ОАО «РЖД» в лаборатории «Л.И.С.Т.» («Лаборатория Исследования Световых Технологий»).

Объектом исследований являлись осветительные приборы со светодиодами (ОП с СД), наиболее близкие по конструкции и светотех-



Рис. 1. Панель ExP-600 (вверху), СОЛ-1 (образец № 1, внизу слева), СОЛ-1 (образец № 3, внизу справа)

ническим параметрам к светильникам с традиционными источниками света, используемым в настоящее время в кабинах локомотивов и помещениях диспетчерских систем железнодорожного транспорта. Были выбраны и исследовались следующие осветительные приборы: светильники СОЛ-1 (образцы № 1 и 3, производства ЗАО НПО «РоСАТ») для освещения кабин локомотивов, предназначенные для замены плафонов с лампой накаливания, светодиодная панель ExP-600 (производства ООО «Экспомет») для освещения помещений диспетчерских систем, предназначенная для замены светильников с люминесцентными лампами. Фотографии светильников представлены на рис. 1.

По данным В. Йордан, В. Халбриттер и В. Хорак [4], основным радиометрическим параметром при оценке фотобиологической опасности светильников является спектральное распределение их энергетической яркости. При измерении радиометрических характеристик светильников должны строго соблюдаться условия, приведенные в таблице «Сводка требований стандартов CIE S009/IEC 62471» [4].

Таблица 1. Расстояние для измерений радиометрических параметров r

Наименование светильника	Расстояние от светильника по направлению осевой силы света, на котором обеспечивается освещенность 500 лк, м
СОЛ-1, образец № 1	0,443
СОЛ-1, образец № 3	0,486
Светодиодная панель ExP-600	1,440

Таблица 2. Диаметры диафрагм поля зрения

Наименование светильника	Входной (апертурный) угол γ , рад	Диаметры диафрагмы поля зрения, м
СОЛ-1, образец № 1	0,1	0,0443
	0,011	0,0049
СОЛ-1, образец № 3	0,1	0,0486
Светодиодная панель ExP-600	0,1	0,160

Измерение радиометрических параметров излучения светильников общего освещения должно проводиться с расстояний, на которых светильники создают освещенность, равную 500 лк, при входном (апертурном) угле γ , определяемом конкретным видом опасности и группой риска.

Энергетическая яркость светильника L (Вт/м²·ср) определялась по формуле (1):

$$L = P/S\Omega, \quad (1)$$

где P — измеряемая радиометром интегральная мощность излучения, Вт, S — площадь светящейся части светильника, вырезанная углом γ , м²; Ω — телесный угол, в котором заключено измеренное излучение, ср.

При этом:

$$S = \pi r_1^2 = \pi (\operatorname{tg}(\gamma/2) \times r)^2 \quad (2)$$

где r_1 — радиус светящейся части площади светильника, вырезанной углом γ , м; r — расстояние от светильника до измерительной апертуры радиометра, м.

$$\Omega = 2\pi\gamma. \quad (3)$$

Расстояние r предварительно определялось от поверхности рассеивателя светильника до плоскости, на которой освещенность была равна 500 лк. Перед измерениями освещенности светильники работали более 1,5 ч. Результаты измерений расстояния приведены в таблице 1.

Для измерения интегральной мощности излучения использовалась радиометрическая головка и гониометр в составе стенда «Флакс 20»; для измерения относительного спектрального распределения мощности излучения — спектрометрический стенд «Спекорд»; для измерения пространственного распределения силы света — фотометрический стенд «Флакс 20», включающий гониометр и фотометрическую головку.

В помещении фотометрической лаборатории поверхности потолка, стен и пола имели светопоглощающее покрытие с коэффициентом отражения менее 0,03. Температура в помещении во время измерений составляла $+25 \pm 1$ °С.

Измерения мощности излучения всех исследуемых светильников проводились при диаметре апертурной диафрагмы радиометрической головки 7 мм (приведено к диаметру зрачка

темноадаптированного глаза). Для оценки светильников по требованиям «группы полного отсутствия риска от опасности «синего» излучения для сетчатки» при измерениях мощности излучения обеспечивался входной (апертурный) угол $\gamma = 0,1$ рад. А для оценки светильника СОЛ-1 образец № 1, с максимальным излучением в длинноволновой области спектра из исследованных светильников, по требованиям «группы полного отсутствия риска от термической опасности для сетчатки» мощность излучения была измерена и при входном (апертурном) угле $\gamma = 0,011$ рад. Соответствующие входные углы обеспечивались расстояниями между плоскостью входного окна радиометра (табл. 1) и масками, устанавливаемыми на соответствующий светильник, с диаметрами диафрагм поля зрения, приведенными в таблице 2.

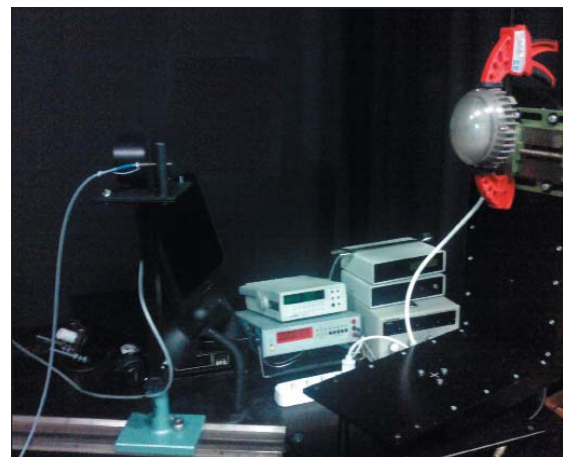


Рис. 2. Установка светильника на гониометр

Исследования фотобиологической опасности светильников с СД проводились в следующем порядке.

Светильник устанавливался на гониометр фотометрического стенда «Флакс 20» (рис. 2), и на него подавалось номинальное напряжение. Светильник работал в течение 1,5–2 ч, до достижения стабилизации параметров.

Далее измерялось пространственное распределение силы света с помощью фотометрической головки, расположенной на расстоянии порядка 18 м от гониометра (точное расстояние зависит от типа светильника и его геометрических размеров) (рис. 3).



Рис. 3. Фотометрическая трасса для измерения параметров светильников. В конце коридора размещается фотометр или радиометр



Рис. 4. Спектрометрический стенд «Спекорд» и измерение спектрального распределения излучения светильника

На выбранном (табл. 1) расстоянии для каждого светильника измерялось относительное спектральное распределение мощности излучения с помощью спектрометрического стенда «Спекорд» (рис. 4) по оптической оси светильника и под углом 75° к оптической оси в плоскости симметрии светильника. Последнее выполнялось для оценки отличия спектрального распределения излучения в направлении оси светильника и под большим углом наблюдения, всегда присутствующего у приборов на основе светодиодов и могущего повлиять на дальнейшие расчеты и достоверность полученных значений энергетической яркости. Затем на светильник устанавливалась подготовленная заранее маска с диафрагмой, диаметр которой по таблице 2 соответствовал входному (апертурному) углу $\gamma = 0,1$ рад (рис. 5).



Рис. 5. Светильник с маской, обеспечивающей заданную полевою диафрагму

Поворотная часть гониометра со светильником устанавливалась так, чтобы оптическая ось светильника была параллельна рельсу, на котором установлены гониометр и радиометр и который расположен под углом к направлению измерения пространственного распределения силы света фотометром. На рельсе устанавливалась радиометрическая головка (рис. 6) с входной (апертурной) диафрагмой в 7 мм на расстоянии по таблице 1, измеренном с помощью лазерного дальномера Leica Disto A5. В процессе исследования замерялся ток I в измерительной цепи радиометрической головки, освещенной светильником через диафрагму маски. Для светильника СОЛ-1 образец № 1 дополнительно устанавливалась маска с диафрагмой, диаметр которой по таблице 2 соответствовал входному (апертурному) углу $\gamma = 0,011$ рад, и снова замерялся ток в измерительной цепи радиометрической головки.

Мощность излучения светильника P , измеренная радиометром и заключенная в заданном входным углом γ телесном угле Ω , определялась по следующей формуле (4):

$$P = I/K_x, \quad (4)$$

где I — ток радиометра, А; K_x — коэффициент чувствительности радиометра для спектрального распределения излучения исследуемого светильника.

Коэффициент K_x (А/Вт) определялся на основе относительного спектрального распределения излучения светильника ϕ_λ , измеренного ранее, характеристики относительной спектральной чувствительности радиометра Λ_λ (рис. 7) и паспортного максимального коэффициента чувствительности радиометра $\Lambda_{\max} = 0,50622$ А/Вт по следующей формуле (5):

$$K_x = \Lambda_{\max} \int \phi_\lambda \times \Lambda_\lambda \times d\lambda. \quad (5)$$

Энергетическая яркость светильника L (Вт/(м²·ср нм)) определялась по формуле (1). Спектральное распределение энергетической яркости светильника для заданных условий измерения определялось по следующей формуле (6):

$$L_\lambda = C \times \phi_\lambda, \quad (6)$$

где ϕ_λ — относительное спектральное распределение излучения светильника, C — нормирующий коэффициент (Вт/(м²·ср нм)), рассчитываемый следующим образом (7):

$$C = L / \int \phi_\lambda \times d\lambda. \quad (7)$$

Для оценки опасности «синего» излучения светильника для сетчатки рассчитывалось значение энергетической яркости эффективного излучения синего света L_B (Вт/(м²·ср)) по следующей формуле (8) [1]:

$$L_B = \sum_{\lambda=300\text{нм}}^{\lambda=700\text{нм}} L_\lambda \times B(\lambda) \times \Delta\lambda, \quad (8)$$

где $B(\lambda)$ — спектральное взвешивание с учетом длины волны, вызывающее фотохимическое поражение зрения синим светом (табл. 1.3 [1]).



Рис. 6. Радиометрическая головка

Для оценки термической опасности излучения светильника для сетчатки рассчитывалось значение энергетической яркости эффективного излучения теплового поражения L_R по формуле (9) [1]:

$$L_R = \sum_{\lambda=380\text{нм}}^{\lambda=1400\text{нм}} L_\lambda \times R(\lambda) \times \Delta\lambda, \quad (9)$$

где $R(\lambda)$ — спектральное взвешивание с учетом длины волны, наносящее тепловое поражение

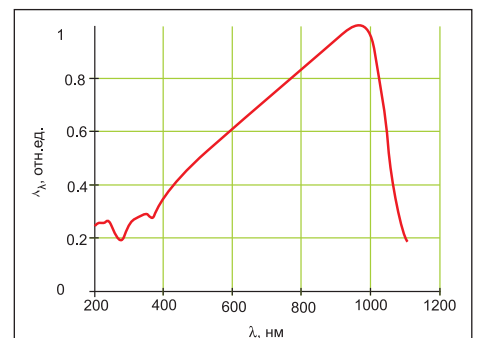


Рис. 7. Относительная спектральная чувствительность Λ_λ радиометрической головки

Таблица 3. Светотехнические параметры светодиодной панели

Осевая сила света, кд	1206
Световой поток, лм	2643
Потребляемая мощность, Вт	58
Световая отдача, лм/Вт	45,65
Цветовая температура $T_{\text{цв}}$, К	4988

зрению посредством видимого и импульсно-излучения, приведено в таблице 1.3 [1]. При этом значения L_{λ} должны быть определены для соответствующего значения входного угла $\gamma = 0,011$.

Окончательная оценка фотобиологической опасности осветительных приборов со светодиодами проводилась сравнением значений L_B и L_R с предельными значениями, приведенными в таблице «Сводка требований стандартов CIE S009/IEC 62471» [4].

Полученные данные удобнее рассматривать отдельно для каждого образца, представляющего свой класс по характеристикам и месту применения.

Результаты исследований светодиодной панели ExP-600

Светодиодная панель ExP-600 (далее светодиодная панель) может использоваться в качестве встраиваемого светодиодного светильника в подвесные потолки с шагом ячейки 600×600 мм или как отдельный накладной светильник потолочного или настенного крепления. Светодиодная панель предназначена для освещения офисов, торговых и складских помещений.

Технические характеристики ExP-600 (по данным производителя):

- питающее напряжение 110–240 В 50–60 Гц;
- потребляемая мощность светильника 45 Вт;
- класс электробезопасности II;
- коэффициент пульсации 4,75;
- цвет белый (5000 К) и теплый белый (2800 К);
- класс защиты IP40;
- климатическое исполнение УЗ.1;
- рабочий диапазон температур –20...+50 °С;
- массо-габаритные показатели 597×597×75 мм, 1,8 кг.

Светодиодная панель имеет две взаимно перпендикулярные плоскости симметрии. Результаты измерения пространственного распределения силы света в них и расчетов фотометрических параметров на основе диаграмм распределения показаны на рис. 8. В таблице 3 приведены результаты измерения основных светотехнических параметров светодиодной панели.

Результаты измерения относительного спектрального распределения излучения светодиодной панели иллюстрирует рис. 9.

Результаты радиометрических измерений и расчетов значений параметров, необходимых для определения спектрального распределения энергетической яркости для условий «группы

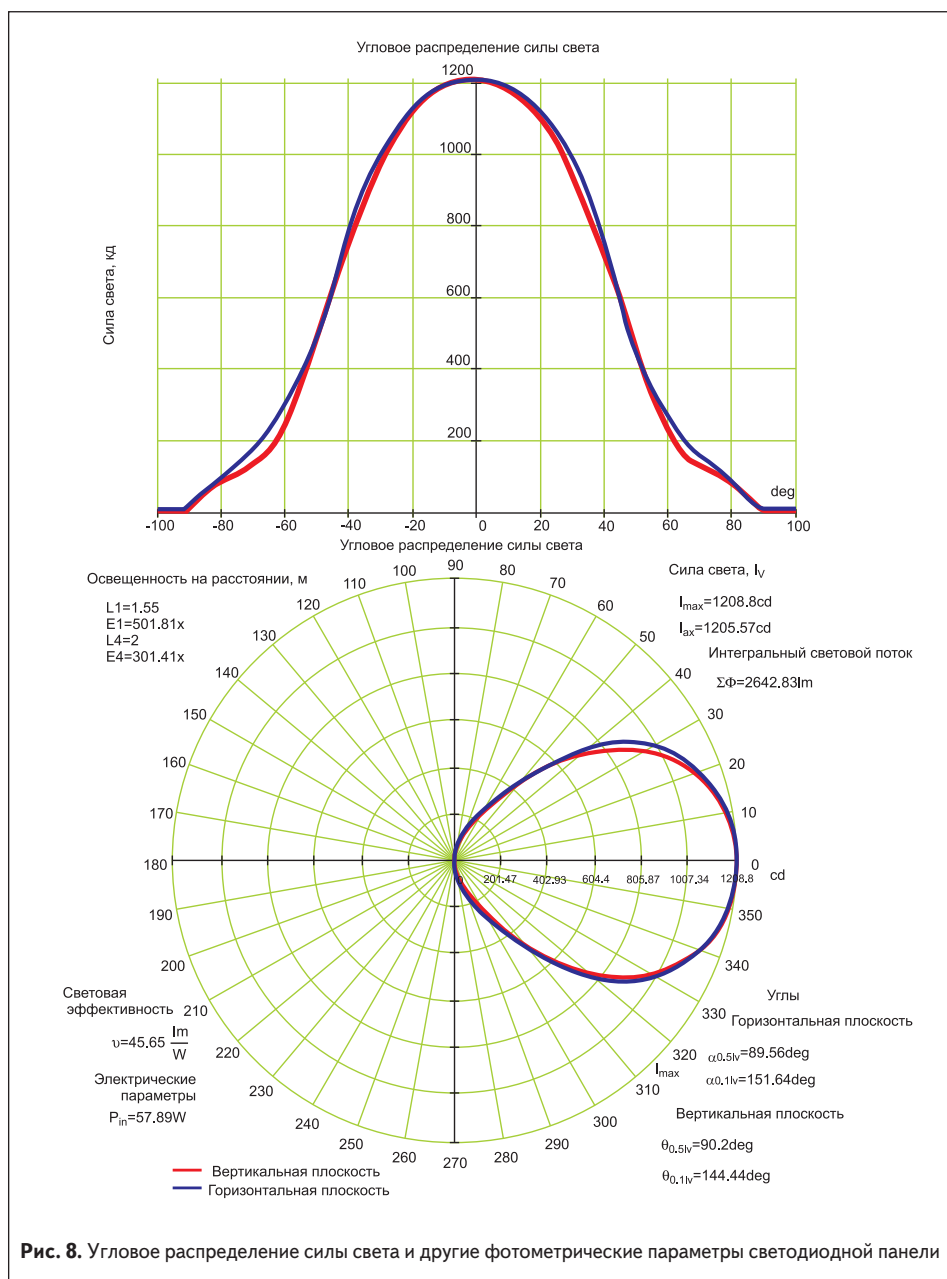


Рис. 8. Угловое распределение силы света и другие фотометрические параметры светодиодной панели

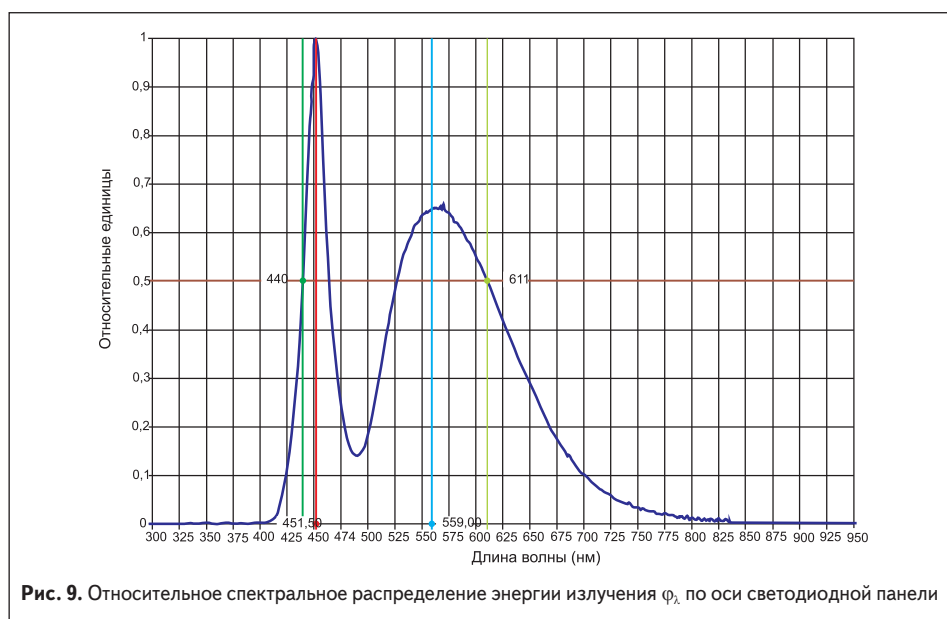


Рис. 9. Относительное спектральное распределение энергии излучения ϕ_{λ} по оси светодиодной панели

Таблица 4. Радиометрические и эффективные параметры излучения светодиодной панели

Фототок радиометра I , А	$1,4 \times 10^{-5}$
$K_x = \int_{\lambda} \Phi_{\lambda} \times \lambda_{\lambda} \times d\lambda$, А/Вт	0,285
$P = I / K_x$, Вт	$4,912 \times 10^{-6}$
r , м	1,44
γ , рад	0,1
S , м ²	0,019696
$\Omega = 2\pi \times \gamma$, ср.	0,628
$L = P / \Omega$, Вт/(м ² ·ср)	$3,574 \times 10^{-4}$
$\int \Phi_{\lambda} \times d\lambda$, нм	240
$C = L / \int \Phi_{\lambda} \times d\lambda$, Вт/(м ² ·ср нм)	$1,5 \times 10^{-6}$
$L_{\lambda} = 1,5 \times 10^{-6} \times \Phi_{\lambda}$, Вт/(м ² ·ср нм)	
$L_B = \sum_{\lambda=300\text{ нм}}^{\lambda=700\text{ нм}} L_{\lambda} \times B(\lambda) \times \Delta\lambda$, Вт/(м ² ·ср)	$4,122 \times 10^{-5}$

полного отсутствия риска от опасности «синего» излучения для сетчатки», приведены в таблице 4.

Результаты исследований светодиодного светильника СОЛ-1

Светодиодные светильники СОЛ-1 (далее светильники) предназначены для освещения: оборудования, устанавливаемого в кузове локомотива; проходов и коридоров; ходовой части локомотива; жилых и общественных помещений; производственных зданий; гаражных боксов; лестничных клеток; лифтов; подземных переходов. Светильники устанавливаются на стеновые или потолочные поверхности.

Технические характеристики светильника (по данным производителя):

- потребляемая мощность не более 15 Вт;
- диапазон номинальных напряжений питания постоянного тока 24–110 В;

- диапазон номинальных напряжений питания переменного тока 50–240 В;
- световой поток Φ 450 ±90 лм;
- срок службы 50 000 ч;
- цвет холодный белый (6500–8000 К), натуральный белый (4000–5000 К), теплый белый (3000 К);
- класс защиты IP53;
- климатическое исполнение УХЛ1 по ГОСТ 15150-69;
- диапазон рабочих температур –55...+60 °С;
- массо-табаритные показатели 157×128×106 мм, 2 кг.

Светильник имеет две взаимно перпендикулярные плоскости симметрии.

Светильник СОЛ-1, образец № 3

Результаты измерения пространственного распределения силы света в двух плоскостях симметрии и расчетов на их основе фотометрических параметров образца № 3 показаны на рис. 10. В таблице 5 приведены результаты измерения его основных светотехнических параметров.

Результаты измерения относительного спектрального распределения излучения и координаты цветности образца № 3 можно увидеть на рис. 11. Результаты радиометрических измерений и расчетов значений параметров, необходимых для определения спектрального распределения энергетической яркости для условий «группы полного отсутствия риска от опасности «синего» излучения для сетчатки», приведены в таблице 6.

Светильник СОЛ-1, образец № 1

Результаты измерения пространственного распределения силы света в двух плоскостях

Таблица 5. Светотехнические параметры образца № 3

Осевая сила света, кд	142
Световой поток, лм	475
Потребляемая мощность, Вт	10
Световая отдача, лм/Вт	47,5
Цветовая температура $T_{\text{цв}}$, К	4210

Таблица 6. Радиометрические и эффективные параметры излучения светильника СОЛ-1 образец № 3

Фототок радиометра I , А	$6,232 \times 10^{-6}$
$K_x = \int_{\lambda} \Phi_{\lambda} \times \lambda_{\lambda} \times d\lambda$, А/Вт	0,29
$P = I / K_x$, Вт	$2,145 \times 10^{-6}$
r , м	0,486
γ , рад	0,1
S , м ²	$1,854 \times 10^{-3}$
$\Omega = 2\pi \times \gamma$, ср	0,628
$L = P / \Omega$, Вт/(м ² ·ср)	$1,842 \times 10^{-2}$
$\int \Phi_{\lambda} \times d\lambda$, нм	331,8
$C = L / \int \Phi_{\lambda} \times d\lambda$, Вт/(м ² ·ср нм)	$0,555 \times 10^{-4}$
$L_{\lambda} = 0,555 \times 10^{-4} \times \Phi_{\lambda}$, Вт/(м ² ·ср нм)	
$L_B = \sum_{\lambda=300\text{ нм}}^{\lambda=700\text{ нм}} L_{\lambda} \times B(\lambda) \times \Delta\lambda$, Вт/(м ² ·ср)	$1,778 \times 10^{-3}$

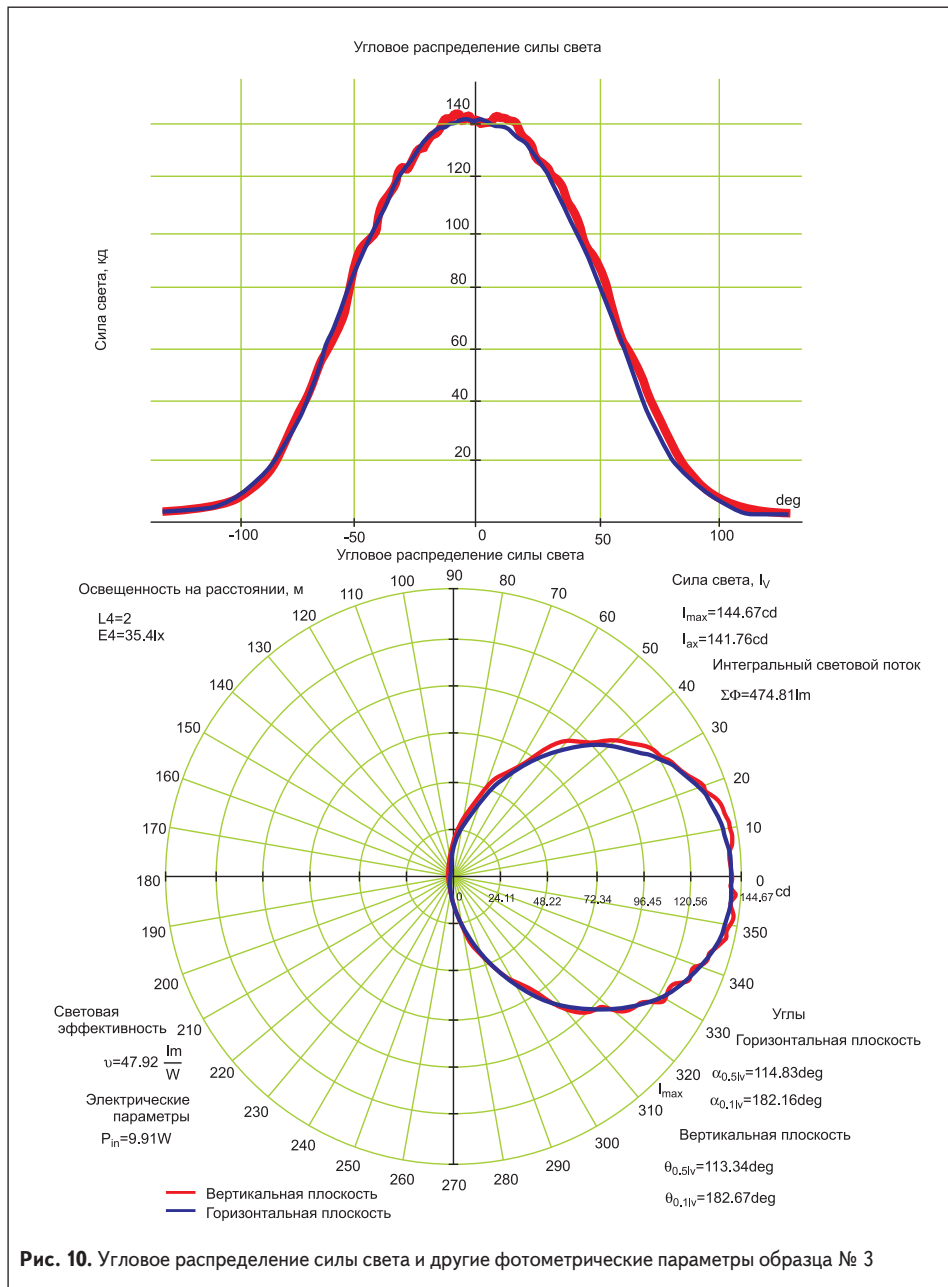
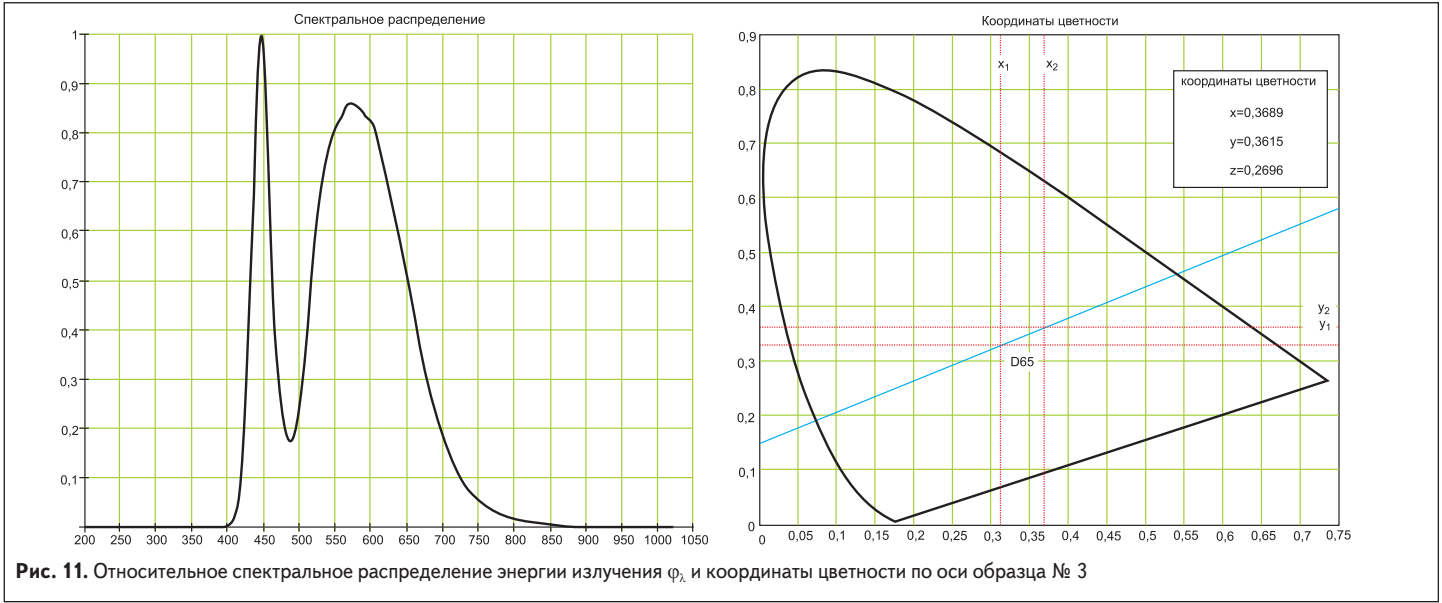


Рис. 10. Угловое распределение силы света и другие фотометрические параметры образца № 3



симметрии и расчетов фотометрических параметров на их основе образца № 1 показаны на рис. 12. В таблице 7 приведены результаты измерения его основных светотехнических параметров.

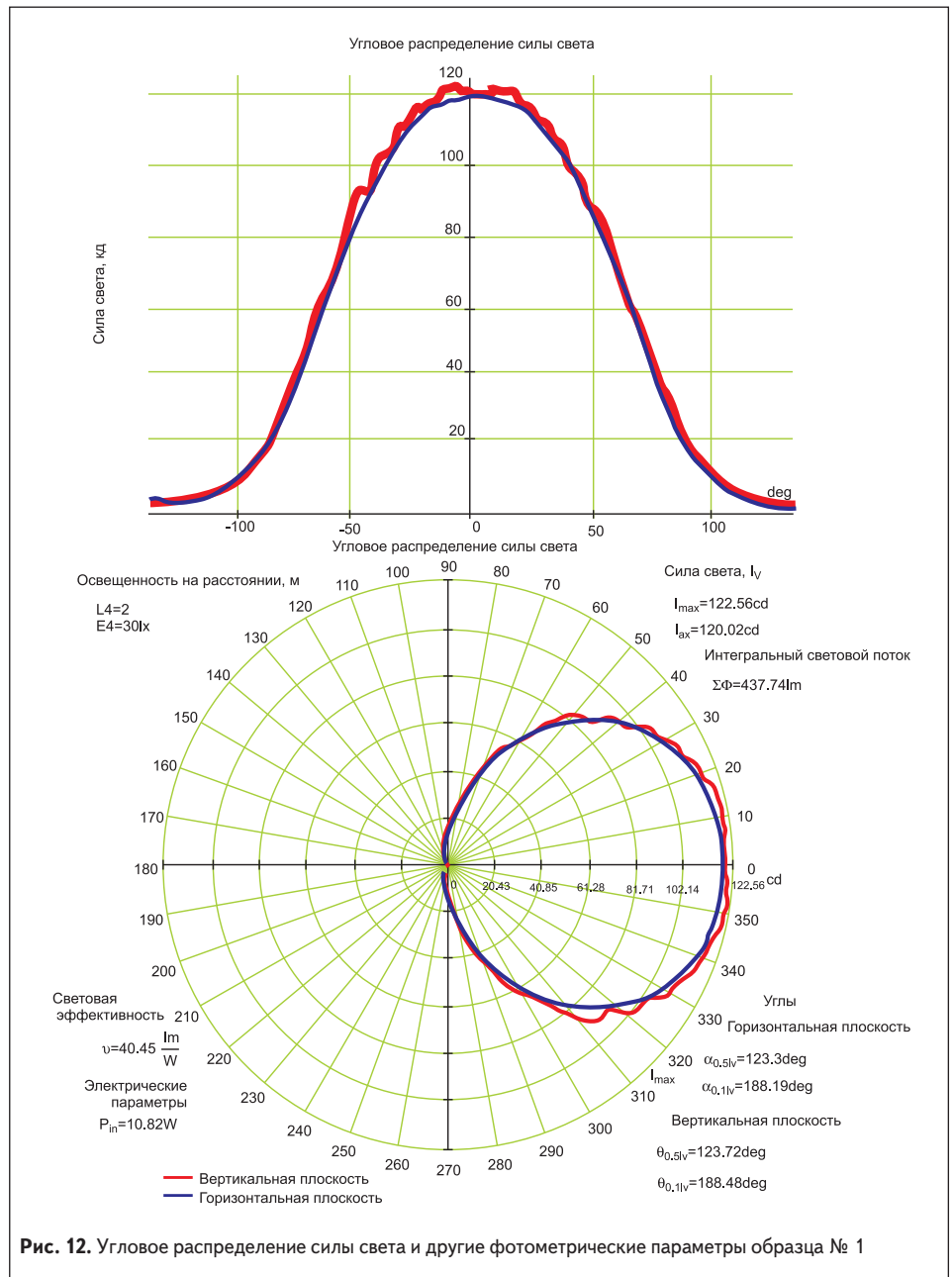
Результаты измерения относительного спектрального распределения излучения и координаты цветности образца № 1 иллюстрирует рис. 13. Результаты радиометрических измерений и расчетов значений параметров, необходимых для определения спектрального распределения энергетической яркости для условий «группы полного отсутствия риска от опасности «синего» излучения для сетчатки», представлены в таблице 8.

Таблица 7. Светотехнические параметры образца № 1

Осевая сила света, кд	120
Световой поток, лм	438
Потребляемая мощность, Вт	10,8
Световая отдача, лм/Вт	40,45
Цветовая температура $T_{цв}$, К	3030

Таблица 8. Радиометрические и эффективные параметры излучения образца № 1

Фототок радиометра I , А	$6,467 \times 10^{-6}$
$K_z = \int_{\max} \varphi_\lambda \times \lambda \times d\lambda$, А/Вт	0,304
$P = I / K_z$, Вт	$2,125 \times 10^{-5}$
r , м	0,443
γ , рад	0,1
S , м ²	$1,5386 \times 10^{-3}$
$\Omega = 2\pi \times \gamma$, ср	0,628
$L = P / \Omega$, Вт/(м ² ·ср)	$2,199 \times 10^{-2}$
$\int \varphi_\lambda \times d\lambda$, нм	348
$C = L / \int \varphi_\lambda \times d\lambda$, Вт/(м ² ·ср нм)	$0,6319 \times 10^{-4}$
$L_\lambda = 0,6319 \times 10^{-4} \times \varphi_\lambda$, Вт/(м ² ·ср нм)	
$L_B = \sum_{\lambda=300\text{ нм}}^{\lambda=700\text{ нм}} L_\lambda \times B(\lambda) \times \Delta\lambda$, Вт/м ² ·ср	$1,379 \times 10^{-3}$



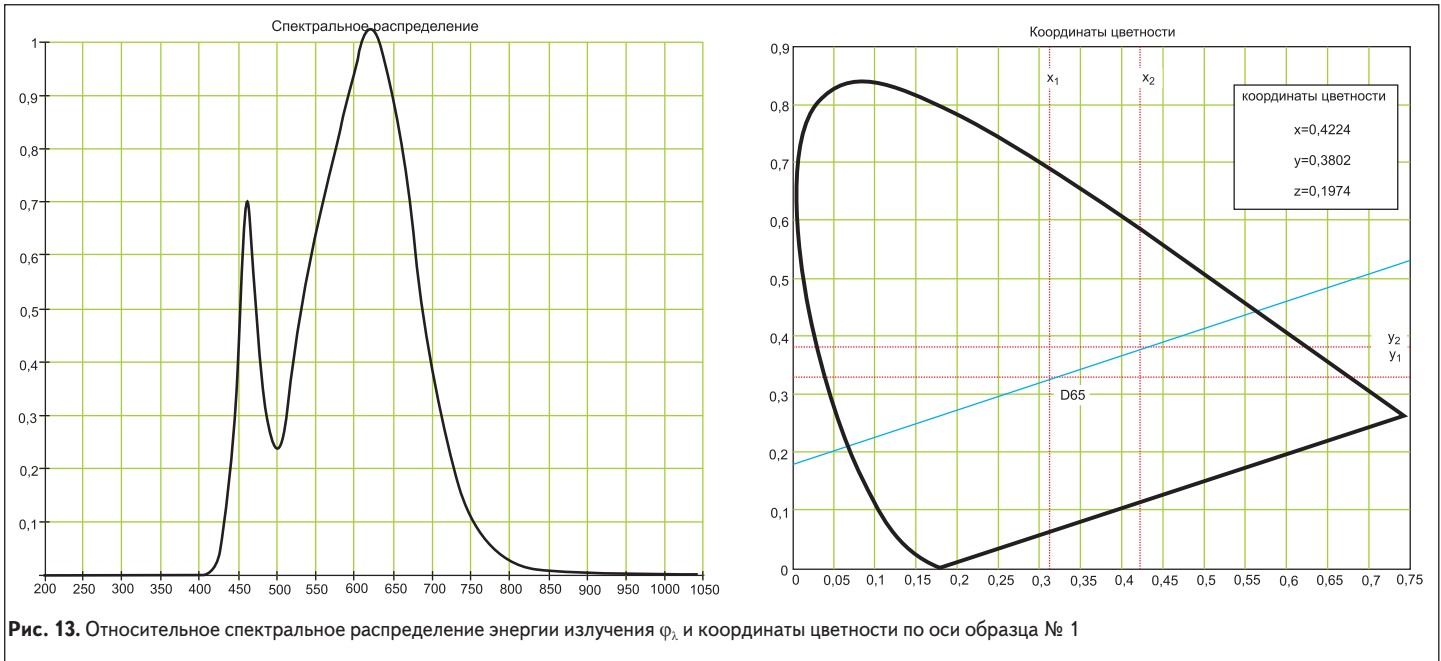


Рис. 13. Относительное спектральное распределение энергии излучения ϕ_λ и координаты цветности по оси образца № 1

Таблица 9. Радиометрические и эффективные параметры излучения образца № 1

Фототок радиометра I , А	$0,823 \times 10^{-7}$
$K_x = \int_{\max} \phi_\lambda \times \lambda \times d\lambda$, А/Вт	0,304
$P = I / K_x$, Вт	$2,708 \times 10^{-7}$
r , м	0,443
γ , рад	0,011
S , м ²	$1,865 \times 10^{-5}$
$\Omega = 2\pi \times \gamma$, ср	0,06908
$L = P / S\Omega$, Вт/(м ² ·ср)	0,21
$\int \phi_\lambda \times d\lambda$, нм	348
$C = L / \int \phi_\lambda \times d\lambda$, Вт/(м ² ·ср·нм)	$6,03 \times 10^{-4}$
$L_\lambda = 0,6319 \times 10^{-4} \times \phi_\lambda$, Вт/(м ² ·ср·нм)	
$L_B = \sum_{\lambda=380nm}^{\lambda=1400nm} L_\lambda \times B(\lambda) \times \Delta\lambda$, Вт/м ² ·ср	0,215

Результаты радиометрических измерений и расчетов значений параметров, необходимых для определения спектрального распределения энергетической яркости для условий «группы полного отсутствия риска от термической опасности для сетчатки», приведены в таблице 9.

Оценка фотобиологической опасности светодиодных светильников

Оценка фотобиологической опасности светодиодных светильников проводилась сравнением значений энергетической яркости эффектив-

ного излучения синего света L_B и энергетической яркости эффективного излучения теплового поражения L_R , определенных в процессе исследований, с предельными значениями, приведенными в таблице «Сводка требований стандартов CIE S009/IEC 62471» [4].

Степень термической опасности для сетчатки глаза зависит от размера изображения источника излучения (ИИ) на ней. Поэтому в случае доминирования термических опасностей углового размер ИИ α известен. При этом:

$$\alpha = 2 \arctg(d/2r) \approx d/r, \quad (10)$$

где d — характерный размер светящего тела; r — расстояние от последнего до измерительной апертуры.

Для определения d используется половина точек изображения ИИ. Для нахождения соответствующего угла α по данной формуле используются два его ограничения: $\alpha_{\min} = 1,7$ мрад и $\alpha_{\max} = 100$ мрад. Выше и ниже этих границ пределы термической опасности для сетчатки не зависят от размеров ИИ.

Для светильника СОЛ-1 № 1: $d = 0,0785$ м; $r = 0,443$ м; $\alpha = 0,177$ рад, что в 1,77 раза больше $\alpha_{\max} = 100$ мрад. Следовательно, для определения предельного значения L_R принимаем $\alpha = 100$ мрад, и предельное значение $L_R = 2,8 \times 104/\alpha = 280$ Вт/(м²·ср).

В таблице 10 представлены значения L_B и L_R , полученные в результате исследования светодиодных светильников, предназначенных для освещения рабочих мест машинистов локомотивов и диспетчерских систем желез-

нодорожного транспорта. В той же таблице приведены предельные значения L_B для «группы полного отсутствия риска от опасности «синего» излучения для сетчатки» и предельные значения L_R для «группы полного отсутствия риска от теплового поражения сетчатки».

Анализ данных таблицы 10 показывает, что для всех исследованных осветительных приборов со светодиодами величины L_B и L_R значительно меньше предельных.

В результате проведенной оценки фотобиологической опасности исследованных светильников можно сделать вывод о том, что они относятся к «группам полного отсутствия риска от опасности «синего» излучения и теплового поражения сетчатки».

В заключение следует отметить, что использованный метод измерения энергетической яркости без создания изображения светящей части светильника на приемнике радиометра с помощью объектива вносит дополнительную погрешность. Погрешность составляет 10–20% от заданного входного угла γ в сторону его увеличения. Дополнительная погрешность увеличивает измеренные значения энергетической яркости. Однако превышение предельных значений намного больше даже увеличенных измеренных величин, что никак не влияет на оценку фотобиологической безопасности исследованных светильников.

Литература

1. Richtlinie 2006/25/EG // Amtsblatt der Europäischen Union. 2006. Vol. 27, № 4.
2. CIE S009:2006 (<http://www.cie.co.at/cie/>).
3. IEC 62471:2006 (<http://www.iec.ch/>).
4. Йордан В., Халбриттер В., Хорак В. Метрологические требования к определению характеристик фотобиологических опасностей ламп и светодиодов // Светотехника. 2009. № 5.

Таблица 10. Измеренные и предельные значения L_B и L_R

Тип светильника со светодиодами	L_B , Вт/(м ² ·ср)		L_R , Вт/(м ² ·ср)	
	измеренные	предельные	измеренные	предельные
Светодиодная панель ExP-600	$4,122 \times 10^{-5}$	100		
Светильник СОЛ-1 № 3	$1,778 \times 10^{-3}$			
Светильник СОЛ-1 № 1	$1,379 \times 10^{-3}$		0,215	280