

«Синяя опасность» и осветительные установки

В работе оценена «синяя опасность» в соответствии со стандартами [5–8] для осветительных приборов (ОП) с различными источниками света. Показано, что в ряде случаев при $T_{\text{цв}} > 6000$ К и световых потоках ОП свыше 20 000 лм доза «синей опасности» может превысить допустимую. Одновременно сравнивались экспозиции (дозы) на основе вертикальной облученности «синей опасности» в ОУ и потенциально опасной дозы, вызывающей фотоповреждение сетчатки и полученной на приматах [9]. В проведенных расчетах указано на ряд условий.

В задаче построения оптимальной осветительной установки (ОУ) проблема воздействия синего света на человека (световой ретинит) и его специфика обсуждается в последнее время весьма интенсивно [1–13]. Это связано с тем, что развитие светодиодного освещения обязано в первую очередь прогрессу холодного белого светодиода, в котором получена наибольшая световая отдача при максимальном ресурсе [14]. Между тем этот источник света имеет в своей основе гетероструктуру InGaN/GaN, генерирующую синее излучение ($\lambda = 400\text{--}470$ нм), составляющее значительную часть в общем потоке белого света. Во всех экспериментах, связанных с изучением биологического и фотохимического воздействия видимого излучения, световые приборы на базе холодного белого света принято считать потенциально опасными.

Воздействие синего света в связи с созданием ОУ сейчас рассматривается в двух аспектах:

- воздействие синего излучения на гормональную динамику человека и его циркадные ритмы;
- фотохимическое повреждение сетчатки глаза от хронического облучения «синим светом».

Первый аспект частично рассмотрен в нашей публикации «К расчету светотехнических установок, учитывающих циркадианные эффекты освещения» [15], где в том числе сформулированы некоторые вопросы, подлежащие уточнению.

Второй аспект получил конкретную трактовку начиная еще с 1996 года, в виде стандартов [5–8], где приведены дозы и уровни эффективной энергетической яркости излучения, опасные для сетчатки глаза.

Работы по изучению указанного воздействия продолжают в МКО и приводятся в последних публикациях. К сожалению, пока все попытки снизить уровень синего света с помощью различных люминофоров и получения $T_{\text{цв}} < 6000$ К приводят к снижению световой отдачи.

Прежде чем оценить «синюю опасность» в реальных осветительных установках, отметим два способа снижения яркости синего света в ОУ со светодиодами (СД). Первый способ — различные конструктивные меры удаления люминофора с кристалла, за счет чего уменьшается плотность излучения люминофора, нанесенного либо на колбу лампы, либо на выходную поверхность осветительного прибора [16, 17]. Другой способ снижения плотности излучения светящейся поверх-

ности — применение менее мощных (< 1 Вт) светодиодов, благодаря которым можно создать менее яркую (сейчас на 1,5 порядка величин) поверхность излучения [18].

Ниже мы попытались оценить степень опасности синего света в ОП, применяемых в ОУ внутреннего освещения; оценки проводились по стандартам [5–8]. Согласно указанным стандартам для защиты сетчатки от фотохимического повреждения эффективная энергетическая яркость источника света L_B [Дж·м⁻²·ср⁻¹], оцененная по спектральной функции опасности синего света, не должна превышать уровня, определенного по формулам:

$$L_B t = \sum_{300}^{700} \sum_t L_\lambda(\lambda, t) \times B(\lambda) \times \Delta t \times \Delta \lambda \leq 10^6 \text{ Дж} \times \text{м}^{-2} \times \text{ср}^{-1} \text{ (для } t \leq 10^4 \text{ с), (1)}$$

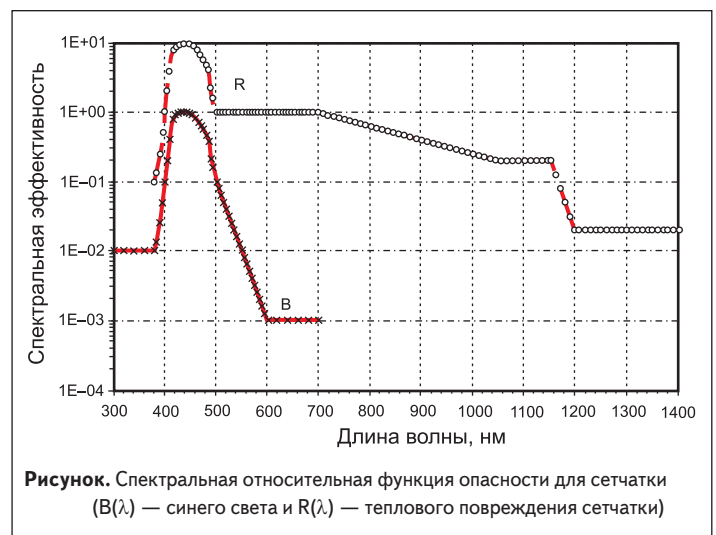
$$L_B t = \sum_{300}^{700} L_\lambda(\lambda) \times B(\lambda) \times \Delta \lambda \leq 100 \text{ Вт} \times \text{м}^{-2} \times \text{ср}^{-1} \text{ (для } t > 10^4 \text{ с), (1a)}$$

где $L_\lambda(\lambda, t)$ — спектральная энергетическая яркость [Вт·м⁻²·ср⁻¹·нм⁻¹], $B(\lambda)$ — спектральная относительная функция опасности синего света [отн. ед.], $\Delta \lambda$ — ширина полосы [нм], t — время облучения в секундах.

Для L_B , превышающей 100 Вт·м⁻²·ср⁻¹, максимально допустимое время облучения t_{max} в секундах должно подсчитываться по формуле:

$$t_{\text{max}} = 10^6 / L_B. \quad (2)$$

Спектральная относительная функция опасности синего света $B(\lambda)$ представлена в таблице 1 и на рисунке совместно с функцией тепловой опасности для сетчатки глаза $R(\lambda)$ [5–8].



Эффективная энергетическая яркость синего света L_B от ОП, принимаемого за равнояркий излучатель с углом излучения 120° (наиболее часто встречающийся случай в практике ОП для внутреннего освещения), определялась как:

$$L_B = \frac{a \int_{300}^{700} f(\lambda) B(\lambda) d\lambda}{2\pi S_{CB} \int_0^{\frac{\pi}{3}} \sin \alpha \cos \alpha d\alpha}, \quad (3)$$

где $f(\lambda)$ — спектральное распределение энергии излучения источника света (ИС) в ОП в диапазоне 300–700 нм в относительных единицах, [нм⁻¹]; $B(\lambda)$ — рисунок и таблица 1; a — нормирующий множитель [Вт], определенный нами для каждого ОП со световым

потокотом 1000 лм, Вт/1000 лм; S_{CB} — площадь выходного отверстия ОП, м².

В дальнейших расчетах площадь выходного отверстия осветительных приборов принимается различной для трех групп ОП, используемых в установках внутреннего освещения:

- I группа: ОП с СД и ЛЛ;
- II группа: ОП с КЛЛ;
- III группа: ОП с МГЛ и ДНаТ.

В таблице 2 приведены оценки фотобиологической «синей опасности» излучения ОП с различными ИС [5–8]. Как можно видеть из таблицы 2, превышение допустимой стандартными [5–8] дозы синего света при величинах светового потока ОП 20 000 лм и более наблюдается для ОП с ИС, имеющими $T_{цв} > 6000$ К.

Таблица 1. Спектральная относительная функция, позволяющая оценить опасность для сетчатки, исходящую от синего света широкополосных источников излучения

Длина волны, нм	Функция опасности синего света $B(\lambda)$
300	0,01
305	0,01
310	0,01
315	0,01
320	0,01
325	0,01
330	0,01
335	0,01
340	0,01
345	0,01
350	0,01
355	0,01
360	0,01
365	0,01
370	0,01
375	0,01
380	0,01
385	0,013
390	0,025
395	0,05
400	0,10
405	0,20
410	0,40
415	0,80
420	0,90
425	0,95
430	0,98
435	1,0
440	1,0
445	0,97
450	0,94
455	0,90
460	0,80
465	0,70
470	0,62
475	0,55
480	0,45
485	0,40
490	0,22
495	0,16
500–600	$10^{[(450-\lambda)/50]}$
600–700	0,001

Таблица 2. Характеристики осветительных приборов (ОП), учитывающие фотобиологическую опасность синего света [5–8]

Тип ОП	Цветовая температура, К	Световой поток Φ , лм	Активный поток «синей опасности» $F_{\text{син}} \text{ Вт}$	Активная энергетическая яркость синего света L_B^* , Вт м ⁻² ср ⁻¹	Уровень дозы облучения синим светом $L_B \times t$, Дж м ⁻² ср ⁻¹ (t = 8 час)	Примечание
ОП с СД ХБ**	6900	1000	1,23	1,45	41 760	—
		10 000	12,3	14,5	417 600	
		20 000	24,4	29,0	835 200	
ОП с СД ХБ***	6900	1000	1,23	2,90	83 520	— Превышение допустимой дозы
		10 000	12,3	29,0	835 200	
		20 000	24,4	58,0	1 670 400	
ОП с СД НБ**	5200	1000	0,69	0,75	21 600	—
		10 000	6,90	7,5	216 000	
		20 000	13,8	15,0	432 000	
ОП с СД ТБ**	3250	1000	0,51	0,6	17 280	—
		10 000	5,10	6,0	172 800	
		20 000	10,20	12	345 600	
ОП с СД ТБ**	2890	1000	0,23	0,27	7776	—
		10 000	2,30	2,7	77 760	
		20 000	4,6	5,4	155 520	
ОП с ЛЛ**	6200	1000	0,72	0,84	24 192	—
		10 000	7,20	8,4	241 920	
		20 000	14,4	16,8	483 840	
ОП с ЛЛ**	4100	1000	0,67	0,79	23 616	—
		10 000	6,7	7,9	236 160	
		20 000	13,4	15,2	472 320	
ОП с КЛЛ****	2700	1000	0,43	2,0	57 600	—
		10 000	4,30	20	576 000	
		—	—	—	—	
ОП с МГЛ***	6000	1000	0,75	1,76	50 688	— Превышение допустимой дозы
		10 000	7,50	17,6	506 880	
		20 000	15,0	35,2	1 013 760	
ОП с МГЛ***	4200–4500	1000	0,50	1,17	33 696	—
		10 000	5,0	11,7	336 960	
		20 000	10,0	23,52	673 920	
ОП с Na-лампой в.д.***	2050	1000	0,15	0,36	10 080	—
		10 000	1,50	3,5	100 800	
		20 000	3,00	7,00	201 600	

Примечания. * КСС ОП по Ламберту; ** площадь светящейся части ОП принята равной 0,36 м²; *** площадь светящейся части ОП принята равной 0,18 м²; **** площадь светящейся части ОП принята равной 0,09 м².

Таблица 3. Характеристики осветительных установок (ОУ), учитывающие фотобиологическую опасность синего света [9]

Тип ОП	Цветовая температура, К	Горизонтальная освещенность E_v , лк	Вертикальная освещенность на роговице глаза, $E_{v, \text{рлк}}$	Эффективная облученность «синей опасности», $E_{\text{син}} \text{ Вт/м}^2$	Результаты	
					Экспозиция 8 ч, $E_{\text{син}} t$ (± 50), Дж/м ²	Доза облучения, вызывающая повреждение сетчатки [9], Дж/см ²
ОУ с СД ХБ	6900	300 500 1000	100 150 300	0,12 0,18 0,36	3500 5200 10 400	30–40
ОУ с СД НБ	5200	300 500 1000	100 150 300	0,07 0,11 0,22	2000 3000 6000	
ОУ с СД ТБ	3250	300 500 1000	100 150 300	0,06 0,09 0,18	1700 2600 5200	
ОУ с СД ТБ	2890	300 500 1000	100 150 300	0,04 0,05 0,11	1100 1400 3200	
ОУ с ЛЛ	6200	300 500 1000	100 150 300	0,09 0,13 0,27	2600 3700 7800	
ОУ с ЛЛ	4100	300 500 1000	100 150 300	0,08 0,12 0,24	2300 3500 6900	
ОУ с КЛЛ	2700	300 500 1000	100 150 300	0,04 0,06 0,12	1100 1700 3500	
ОУ с МГЛ	6000	300 500 1000	100 150 300	0,10 0,15 0,30	2900 4300 8600	
ОУ с МГЛ	4200–4500	300 500 1000	100 150 300	0,06 0,09 0,20	1700 2600 5800	
ОУ с На-лампов в. д.	2050	300 500 1000	100 150 300	0,02 0,03 0,06	580 860 1700	

Примечание. * КСС ОП принята по Ламберту.

Однако эти оценки касаются практически одного источника опасности — ОП и, как нам представляется, при совершенно невероятных условиях работы зрительного аппарата: наблюдатель, не отрываясь, пристально рассматривает яркий излучатель в течение нескольких часов. Такая перестраховка может быть не совсем оправдана.

Для некоторых уточнений выше приведенных расчетов мы попытались оценить опасность не отдельно взятого ОП, а их совокупности в виде ОУ с варьируемым уровнем освещенности и ОП с разными источниками излучения [15].

Для упрощения оценок сравнивались дозы, оцененные по вертикальной облученности для «синей опасности» в рассматриваемых ОУ и потенциально опасная доза, полученная авторами [19] на приматах в области длин волн 450–460 нм. Из таблицы 3 следует, что разница в дозах при $T_{\text{цв}} > 6000$ К достигает почти порядка величин. Это практически совпадает с выводами, сделанными в недавней работе [20], а также говорит о возможности снижения запретов по стандартам [5–8].

Заключение

Следует заметить некоторую условность приведенных расчетов:

- Такого рода фотохимические реакции при определенных условиях являются необратимыми. При систематическом ежедневном об-

лучении могут накапливаться негативные последствия в сетчатке глаза. В [5–8] эти условия не оговорены.

- Следует особо отметить, что авторы [5–8] нигде не указывают на наличие доказательства спектральной аддитивности параметра $B(\lambda)$, а также на диапазон параметров (облученность и время), при которых справедливо равенство $E_1 t_1 = E_2 t_2$. В [15] мы отмечали эти недостатки при оценках действия полихроматических ИС на циркадные функции. В последующих редакциях стандартов [5–8] подобные неясности должны быть устранены.
- Отметим также, что фотобиологи считают необходимым продолжить указанные в [9] эксперименты, чтобы создать более прочную базу при разработке стандартов, расширив адекватную информацию по приматам.

Литература

1. В. В. Бомель, Г. Ван ден Бельд, В. Ван Ойжен. Промышленное освещение и производительность труда // Светотехника. 2003. № 1.
2. Дж. К. Брейнард, К. А. Бернекер. Влияние света на физиологию и поведение человека // Светотехника. 1996. № 1-2.
3. Вейч Д. Свет, освещение и здоровье — вопросы для рассмотрения // Светотехника. 2005. № 6.
4. Бойс П. Свет и здоровье // Светотехника. 2006. № 2.
5. Illuminating Engineering Society of North America (IESNA). ANSI/IESNA RP-27-96, Recommended Practice for Photobiological Safety for Lamps and Lamp Systems. New York: IESNA. 1996.
6. CIE S 009 /E:2002 «Photobiological Safety of Lamps and Lamp Systems».
7. Стандарт МЭК 62471:2006 «Фотобиологическая безопасность ламп и ламповых систем».
8. ГОСТ Р МЭК/ТО 60825-9-2009 «Безопасность лазерной аппаратуры. Часть 9. Компиляция максимально допустимой экспозиции некогерентного оптического излучения».
9. Dirk van Norren and Theo G. M. F. Gorgels. The Action Spectrum of Photochemical Damage to the Retina: A Review of Monochromatic Threshold Data // Photochemistry and Photobiology // 2011 87.
10. Мурашова М. А., Никифоров С. Г., Шищенко И. И. Исследование фотобиологической опасности светодиодных осветительных приборов // Сборник трудов ученых ОАО «ВНИИЖТ» Проблемы железнодорожного транспорта, задачи и пути их решения. Москва, 2012.
11. Зак П. П., Островский М. А. Потенциальная опасность освещения светодиодами для глаз детей и подростков // Светотехника. 2012. № 3.
12. Барцев А. А., Беляев Р. И., Столяревская Р. И. Методика измерения физиологически эффективной яркости опасного синего излучения осветительного прибора // Светотехника. 2013. № 2.
13. Закгейм А. Л. Светодиодные системы освещения: энергоэффективность, зрительное восприятие, безопасность для здоровья (обзор) // Светотехника. 2012. № 6.
14. www.cree.com
15. Сарычев Г. С., Гаврилкина Г. Н., Пудиков И. В. К расчету светотехнических установок, учитывающих циркадианные эффекты освещения // Полупроводниковая светотехника. 2013. № 4.
16. Митрофанов А. В., Орловский В. Н., Холодилов В. И. Световые приборы с голубыми светодиодами и люминофором в защитном стекле // Светотехника. 2008. № 4.
17. Сарычев Г. С., Сысун В. В. Светодиодная лампа белого свечения // Патент № 2 408 816, зарегистрирован в Госреестре 10 января 2011 г.
18. www.LEDRU.RU
19. Ham W. T., Jr. H. A. Mueller and D. H. Sliney (1976). Retinal sensitivity to damage from short wavelength light. Nature 260.
20. S. Berman, R. Clear. Another blue light hazard // Lighting Design + Application (LD + A). March, 2013.