
УДК 621.321

Сравнительный анализ спектрально-фотометрических характеристик бытовых источников света

И. Василеска, М. А. Корнеева, В. П. Стёпин

*Кафедра прикладной физики
Российский университет дружбы народов
ул. Миклуто-Маклая, д. 6, Москва, Россия, 117198*

Правильная организация искусственного освещения имеет большое значение для создания комфортных бытовых условий в местах, предназначенных для выполнения работ со значительным зрительным напряжением, а также для решения задачи эффективного использования электроэнергии. Целью данной работы является проведение комплексных экспериментальных исследований спектральных, фотометрических и электрических характеристик источников света бытового назначения различных типов. Были выявлены наиболее и наименее энергоэффективные источники, показаны особенности применения в различных условиях, а также проведена проверка соответствия характеристик образцов нормам СанПиН.

Для исследования были выбраны лампы накаливания, металло-галогенные, светодиодные, люминесцентные и компактные люминесцентные лампы. По результатам прямых измерений были определены диаграммы направленности, световой поток и класс энергопотребления отобранных источников света.

Все экспериментальные данные были сведены в единую таблицу, что позволяет наглядно проследить особенности исследованных образцов. Было обнаружено, что измеренные величины для некоторых образцов отличаются от заявленных производителем, причём наибольшее расхождение отмечено у компактных люминесцентных ламп.

Анализ полученных результатов позволил определить целесообразность конкретного применения исследованных источников света. Полученные результаты будут полезны как для специалистов и производителей в области светотехники, так и конечных потребителей.

Ключевые слова: источники света, лампы накаливания, металло-галогенные лампы, светодиодные лампы, люминесцентные лампы, компактные люминесцентные лампы, спектр излучения, цветовая температура, освещённость, диаграмма направленности.

1. Введение

Свет является одним из важнейших явлений природы, влияющих на жизнедеятельность человека, так как более чем 80% информации об окружающем мире и происходящих процессах человек получает через зрительные ощущения. Разработка искусственных источников света (ИС) являлась неотъемлемой частью развития техногенной цивилизации. Современные ИС являются электрическими приборами, в которых электрическая энергия преобразуется в излучение в различных спектральных диапазонах и с различной энергетической эффективностью. Естественно, что в различных областях целевого использования (освещение помещений, освещение рабочего места, мест кратковременной зрительной работы в жилых помещениях и т.п.) к ИС предъявляются различные требования. В этой связи разработка эффективных бытовых ИС по-прежнему является актуальной задачей [1].

Для соблюдения условий оптимальной рабочей среды разработаны общие нормы [2, 3], регламентирующие параметры естественного и искусственного освещения. Однако в области бытового применения ИС эти правила достаточно часто не соблюдаются. Кроме того, в них не отражено, что освещение воспринимается естественным только в случае, если регистрируемое глазом излучение имеет непрерывный спектр в видимой области спектра с распределением энергии, близким к распределению энергии в солнечном излучении [1]. Отмечена особенность,

что глаза меньше всего утомляются при жёлто-зелёном либо белом освещении, а больше всего при красном и фиолетовом [1].

Целью данной работы являлось проведение систематизированных измерений спектральных, фотометрических и энергетических характеристик, наиболее распространённых ИС бытового назначения для сравнительного анализа и определения их соответствия условиям наилучшего зрения, целесообразности их конкретного применения в бытовых условиях, требованиям СанПиН и СНиП [2, 3] и справедливости заявленных производителем характеристик.

2. Постановка и проведение экспериментов

Для исследований были отобраны серийно выпускаемые для цепей с напряжением 220 В лампы бытового назначения: для ламп накаливания (ЛН) — до 100 Вт, для металло-галогенных ламп (МГЛ) — до 46 Вт, для светодиодных ламп (LED) — до 7 Вт, для компактные люминесцентные лампы (КЛЛ) — до 32 Вт, для люминесцентные лампы дневного света (ЛД) — до 18 Вт.

Регистрация спектров производилась с помощью монохроматора-спектрографа MS3500I с дифракционной решёткой 1200 шт/мм, входная и выходная щели составляли 40 мкм. В качестве детектора использовался ФЭУ с фиксированным напряжением 1000 В.

Спектрометрический тракт был откалиброван по длине волны с помощью ртутной лампы (ДРС 50-1), а по абсолютной интенсивности с помощью лампы СИРШ 6-40 (аттестована во ВНИИОФИ). Регистрация спектров испытуемых образцов проводилась на фиксированном расстоянии от световода — 50 см. Обработка полученных спектров проводилась с помощью графического пакета Origin.

Освещённость регистрировалась при помощи люксметра ТКА-ПКМ С051 (государственный реестр средств измерений №24248-09), предназначенного для измерения освещённости в видимой области спектра (380–760 нм) с диапазоном от 10 до 200000 лк (погрешность $\pm 8.0\%$). Измерение распределения освещённости на поверхности 70×70 см проводилось для каждого ИС на расстоянии 50 см.

Коэффициент пульсации определялся при помощи прецизионного фотодиода (быстрый кремниевый фотоприёмника APDF, рабочий диапазон — 320–1000 нм, максимальная чувствительность в диапазоне 730–830 нм). Расстояние между ИС и диодом составляло 50 см.

Измерение электрических характеристик (напряжения питания, потребляемый ток) проводилось с помощью осциллографа (TDS 2024 В). Величина тока определялась по падению напряжения на измерительном шунте ($0,47 \pm 0,05$ Ом).

Тепловые потери определялись с помощью термопары цифрового мультиметра MASTECH MY-62. Измерения проводились по всей поверхности колбы ИС через 10 мин после включения. Было выявлено, что нагрев происходит равномерно по всей поверхности (отклонения не более 10% от максимального значения), в дальнейшем приводится значение лишь максимальной температуры, если это не оговорено дополнительно.

Параметры ИС, заявленные производителями, и результаты экспериментальных измерений сведены в единую таблицу (см. ниже). Существенные отклонения и нарушения санитарных норм выделены особо.

3. Экспериментальные результаты и их обсуждение

Основной характеристикой любого источника света является его спектр излучения. Естественно, что ближе спектр ИС к солнечному, тем более он благоприятен для человека. Как известно [4], солнечный спектр является спектром излучения чёрного тела, представляющим из себя непрерывные континуум. Спектральная излучательная способность в данном случае описывается формулой Планка

и характеризуется цветовой температурой с типичным значением ~ 6000 К. Источники, имеющие аналогичный тип распределения излучения (серое тело), но меньшую яркость, так же характеризуются цветовой температурой. Важно отметить, что если спектральное распределение не описывается формулой Планка (является либо линейчатым, либо сплошным, но с распределением другого типа), то характеризовать его цветовой температурой некорректно. Все существующие ИС бытового назначения имеют спектр, отличный от солнечного. Говорить о «степени соответствия» спектра солнечному сложно, так как нет стандартизованного критерия, который бы его определял. Тем не менее, можно выделить одно принципиальное условие: спектр солнца является сплошным и, следовательно, сравнивать с ним можно только ИС со сплошным спектром. На рис. 1 представлены спектры ЛН и МГЛ разных мощностей, на рис. 2 — LED-спектры.

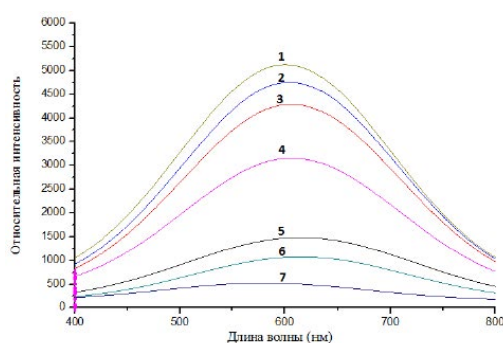


Рис. 1. Спектры ЛН и МГЛ:
 1 — МГЛ 42 Вт; 2 — ЛН 100 Вт;
 3 — ЛН 60 Вт; 4 — МГЛ 42 Вт;
 5 — ЛН 40 Вт;
 6 — ЛН (матовая) 60 Вт;
 7 — МГЛ (рефлекторная) 46 Вт

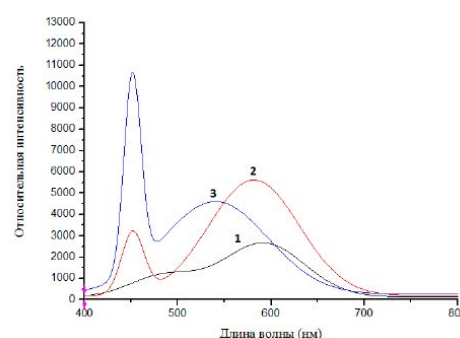


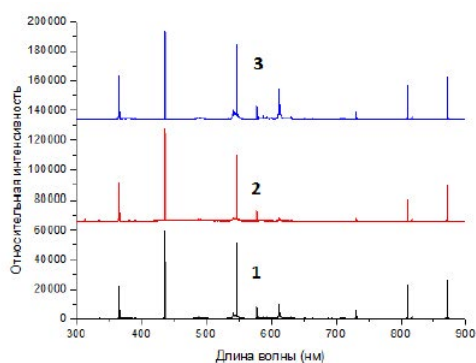
Рис. 2. Спектры LED:
 1 — 5,5 Вт (2700 К); 2 — 7 Вт (2700 К);
 3 — 7 Вт (6400 К)

Из рис. 1 и 2 следует, что спектры ЛН, МГЛ и LED ламп имеют сплошной спектр, но форма их существенно отличается. Лампы накаливания и металлогалогенные лампы имеют одинаковый принцип действия: в обоих случаях излучающим элементом является вольфрамовая нить накала, но колбы МГЛ заполнены буферным газом (парами галогенов), увеличивающими срок службы. Спектр излучения нагретой вольфрамовой нити является спектром серого тела, перекрывающим видимый диапазон и уходящим в инфракрасную область. Цветовая температура серого тела рассчитывается по положению максимума спектра. Спектральные измерения цветových температур ЛН и МГЛ показали их соответствие значениям, заявленным производителями. В данном случае цветовая температура хорошо отражает степень отличия спектра ИС от солнечного: отношение температуры Солнца к температуре ламп ± 2 . В остальных случаях простое сравнение спектров является не корректным.

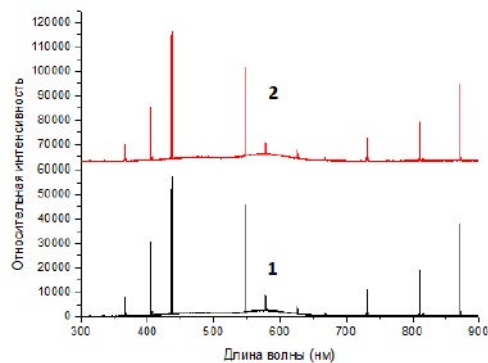
Существенные отличия в спектрах светодиодных ламп и ламп накаливания (см. рис. 1 и рис. 2) свидетельствуют о том, что светодиодные лампы не обладают спектром серого тела, следовательно, говорить в данном случае о цветовой температуре, несмотря на заявления производителей, нельзя. В отличие от ламп накаливания, имеющих существенный участок спектра в инфракрасной области, спектр светодиодных ламп лежит исключительно в области видимого света, что повышает их эффективность. По принципу формирования цветопередачи светодиодные лампы могут быть двух типов [5] — многокристальные и люминофорные. Спектр многокристальных светодиодов получается за счёт наложения узких спектров каждого отдельного кристалла. Спектр люминофорных светодиодов формирует излучение люминофора, который в свою очередь возбуждается

за счёт излучения светодиода в синей или ближней ультрафиолетовой области. По форме спектра на рис. 2 можно определить, что исследованные лампы являются люминофорными светодиодными лампами. Говорить о соответствии солнечному спектру в данном случае сложно. Солнечный спектр имеет максимум интенсивности при длине волны — 550 нм. Одна из исследованных ламп — 3 (рис. 2, температура 6400 К) также имеет максимум на этой длине волны, но при этом у неё есть второй пик в области синего диапазона длин волн (450 нм). Два других исследованных образца — 1, 2 (рис. 2, температуры 2700 К) имеют иное распределение интенсивности в спектральной области излучения. У изученных образцов 1-й максимум соответствует области красного диапазона и приходится на длину волны 600 нм, а второй максимум сосредоточен в области синего диапазона: у одной из ламп он приходится на длину волны 450 нм, а у второй вообще слабо выражен. Таким образом, при покупке светодиодных ламп предсказать форму спектра невозможно, так как указанная производителем цветовая температура не несёт информации о качестве спектра.

На рис. 3а представлены спектры КЛЛ. Несмотря на заявленную производителем цветовую температуру, данные лампы в пределах видимого диапазона имеют обеднённый линейчатый спектр. Видно, что все лампы имеют одинаковый спектральный состав, а разница в качественном ощущении света (тёплый, холодный свет) достигается за счёт перераспределения энергии в спектре. Следует отметить, данный спектр соответствует спектру ртутной газоразрядной лампы, хотя некоторые производители заявляют об отсутствии паров ртути в изделии. Несмотря на название, компактные люминесцентные лампы люминофора не содержат, в отличие от люминесцентных ламп дневного света, в спектре которых присутствует континуум, соответствующий излучению люминофора, на фоне которого проступают линии ртути (рис. 3б). Важно отметить присутствие в спектре излучения линий в ближнем ультрафиолете (365 нм). Говорить о соответствии спектров КЛЛ солнечному невозможно, отличия в данном случае принципиальны.



(а) 1 — КЛЛ 13 Вт (2700 К); 2 — КЛЛ 13 Вт (6500 К); 3 — КЛЛ 32 Вт (2700 К)



(б) 1 — ЛД 18 Вт (2700 К); 2 — ЛД 18 Вт (4000 К)

Рис. 3. Спектры люминесцентных ламп

При использовании ИС важную роль играет поле допустимой освещённости. Согласно требованиям ГОСТ [6] по освещению рабочих поверхностей для кратковременной работы на поверхности $0,4 \times 0,3$ м необходимо > 200 лк, а на рабочем столе на площади $0,3 \times 0,2$ м необходимо > 300 лк. Как показали измерения, данным требованиям удовлетворяют практически все лампы (фиксированное расстояние от ИС до рабочей поверхности — 50 см), за исключением некоторых маломощных ламп (лампа накаливания 40 Вт).

Согласно ГОСТ [7] были определены диаграммы направленности силы света для каждого ИС. Вид диаграмм направленностей большинства ламп (рис. 4) соответствует равномерно направленному типу кривой силы света. Нарушение сферической симметрии диаграммы направленности (рис. 4) в нижней её части обусловлено наличием цоколя ИС. У ламп накаливания, в отличие от КЛЛ и светодиодных ламп, часть излучения распространяется в заднее полупространство, т. е. в сторону цоколя.

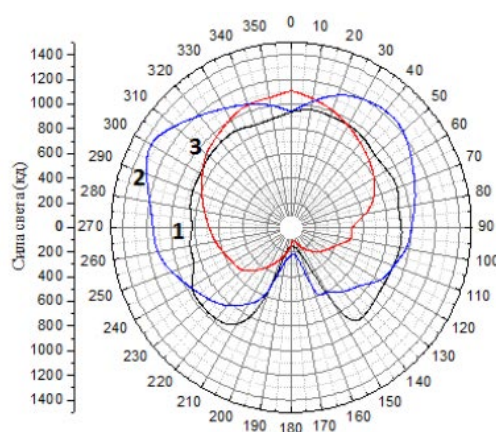
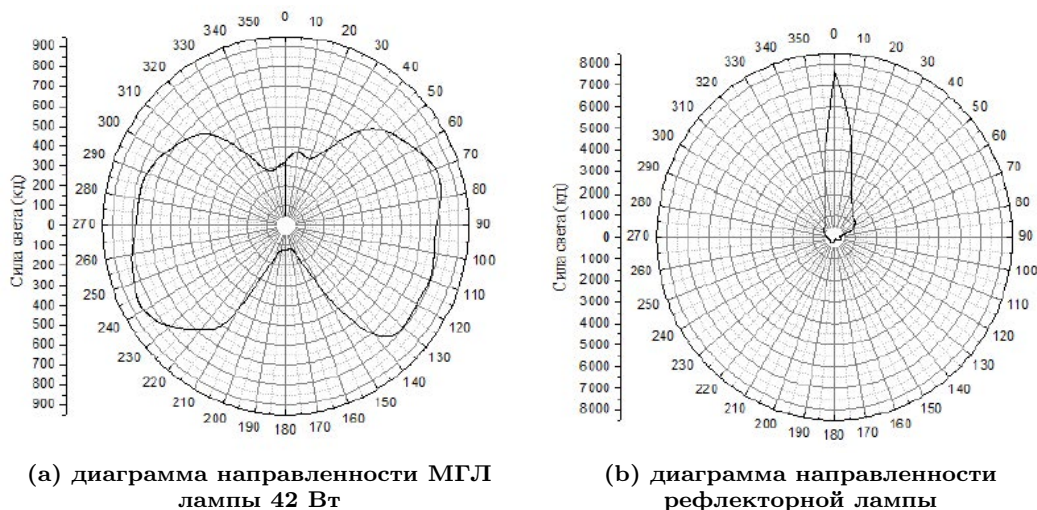


Рис. 4. Диаграммы направленности (для фиксированного расстояния — 50 см): 1 — лампа накаливания 60 Вт, 2 — КЛЛ 12 Вт, 3 — светодиодная лампа 7,7 Вт

Диаграммы направленности МГЛ (рис. 5а) характеризуются широким типом кривой распределения силы света. Диаграмма имеет чёткие боковые максимумы, что резко отличает их от ламп накаливания, КЛЛ и светодиодных ламп.



(а) диаграмма направленности МГЛ лампы 42 Вт

(б) диаграмма направленности рефлекторной лампы

Рис. 5. Диаграммы направленности МГЛ лампы (для фиксированного расстояния — 50 см):

Диаграмма направленности рефлекторной лампы существенно отличается от ИС рассмотренных выше (рис. 5b). Данный случай относится к концентрированному типу кривой диаграммы направленности силы света. Эта особенность отмечена производителем на упаковке. Подобная диаграмма обусловлена конструктивными особенностями и преимущественно определяется форм-фактором данной лампы, что обеспечивает узко направленный пучок света (угол рассеяния $\sim 20^\circ$ при указанных производителем — 30°).

Немаловажным параметром качества освещенности, создаваемой ИС, является коэффициент пульсации, который в соответствии с СНиП [3] не должен превышать 20%. Измерения показали превышение допустимой нормы пульсаций у КЛЛ и люминесцентных ламп дневного света (см. табл. 1).

Таблица 1
Экспериментальные и заявленные производителями характеристики бытовых ламп

Тип ламп	Заявленная мощность, Вт		Измеренная мощность, Вт		Площадь с освещенностью >20лк * см ²		Площадь с освещенностью >40лк ** ±8% см ²		Заявленный световой поток, лм		Измеренный световой поток, лм		Коэффициент пульсации ±3%, %		Угол рассеяния, ±5%, °		Эффективность, лм/Вт	Заявленный класс энергопотребления		Измеренный класс энергопотребления		Тип спектра	Заявленная цветовая температура, °К		Измеренная цветовая температура, ±3%, °К		Присутствие линий в УФ (365 нм)	Наличие ртутных линий в спектре		Тепловые потери, ±10%, %
	40	42,6	855	0	400	469	7	290	11	Е	Е	сплошной	2700	2705	нет	нет		160												
Лампа накаливания	60	63,8	2733	707	710	760	6,2	300	12	Е	Е	сплошной	2700	2706	нет	нет	176													
	100	102	4900	4900	1340	1609	4,3	310	16	С	Д	сплошной	2700	2705	нет	нет	181													
	60	63,8	2826	707	630	621	3,5	290	10	Д	Е	сплошной	2700	2704	нет	нет	156													
Матовая лампа накаливания	42	44,7	2206	660	630	681	5,9	211	15	А	Е	сплошной	3000	2700	нет	нет	115													
	42	44,7	1735	572	630	682	5,8	280	15	А	Е	сплошной	2700	2700	нет	нет	120													
Рефлекторная металлогалогенная лампа	46	48,1	3117	1886	300	320	6,8	20	7	Д	Е	сплошной	2700	2630	нет	нет	192													
Светодиодная лампа	5,5	6,38	2734	700	470	498	5,5	250	78	А+	А++	сплошной	2700	×	нет	нет	32													
	7	8,51	4900	4900	560	591	5	260	69	А++	А++	сплошной	2700	×	нет	нет	33													
	7	8,51	4900	4900	600	643	8	250	76	А++	А++	сплошной	6500	×	нет	нет	32													
КЛЛ	9	11,6	1963	380	522	580	20	250	50	А++	А+	линейчатый	2700	×	нет	есть	66													
	11	-	4900	1585	600	-	25	-	-	А++	-	линейчатый	2700	×	есть	есть	58													
	12	14,1	4900	1663	650	675	20	270	48	А++	А	линейчатый	2700	×	есть	есть	68													
	13	15,2	4900	1886	754	787	23	260	52	А++	А+	линейчатый	2700	×	есть	есть	74													
	13	15,2	4900	1725	650	670	22	260	44	А	А	линейчатый	6400	×	есть	есть	71													
	32	39,9	4900	4900	1780	1860	16	260	47	А++	А	линейчатый	2700	×	есть	есть	78													
КЛЛ в матовом баллоне	14	16,6	4900	3770	740	760	25	260	46	А	А	линейчатый	2700	×	есть	есть	62													
Лампа дневного света	18	17,7	4900	2463	1200	1359	27,6	230	77	А++	А++	линейчатый с континуумом	2700	×	есть	есть	30													
	18	17,7	4900	1256	1200	1359	27,6	230	77	А++	А++	линейчатый с континуумом	4000	×	есть	есть	31													

* освещение мест кратковременной зрительной работы по ГОСТ 8607-82: не менее 200 лк на площади 1200 см² "—" измерения не проводились

** освещение письменных столов по ГОСТ 8607-82: не менее 300 лк на площади 600 см² "×" определение не возможно

Для определения эффективности (лм/Вт) и класса энергопотребления [8] ИС необходимо определить световой поток и потребляемую мощность. Световой поток был рассчитан по результатам измерений диаграмм направленности в соответствии с ГОСТ [9]. Потребляемая мощность для конкретного ИС была рассчитана исходя из осциллографических измерений и представлена в таблице. Полученные результаты также свидетельствуют о расхождениях с данными, заявленными производителями. В частности, из таблицы видно, что МГЛ относятся к наихудшему классу энергопотребления (Е), а лампы типа КЛЛ не могут быть отнесены к ИС с наилучшим типом энергопотребления (А++), а только к типу А/А+.

Тепловые потери ламп хорошо согласуются с классом энергопотребления. Как и предполагалось, самым высоким тепловыделением обладают лампы накаливания ($\geq 150^\circ\text{C}$), за ними идут металло-галогенные ($\geq 100^\circ\text{C}$), КЛЛ ($\geq 50^\circ\text{C}$) и светодиодные и лампы дневного света ($\leq 50^\circ\text{C}$). Исключением является лампа рефлекторного типа, имеющая очень высокую температуру в центре ($\approx 200^\circ\text{C}$), при этом боковая поверхность имеет температуру $\leq 50^\circ\text{C}$. Так же стоит отметить, что матовая поверхность колбы лампы снижает температуру на 10–15% по сравнению с лампами аналогичного типа и мощности.

4. Заключение

Полученные результаты свидетельствуют о том, что большая часть отобранных ИС имеет отклонения от заявленных производителем характеристик, что свидетельствует о низком выходном контроле изделий на предприятиях. Полученные результаты измерений можно обобщить по каждому типу ИС, выделив основные достоинства и недостатки.

Светодиодные лампы обладают наилучшими характеристиками:

- ✓ сплошной спектр;
- ✓ низкий коэффициент пульсации;
- ✓ высокая эффективность (A++);
- ✓ низкое тепловыделение;
- × упоминание производителем цветовой температуры является некорректным.

Лампы накаливания и металло-галогенные лампы уступают светодиодным лампам по энергопотреблению и тепловыделению:

- ✓ сплошной спектр;
- ✓ низкий коэффициент пульсации;
- ✓ соответствие заявленной цветовой температуре;
- × низкая эффективность и высокое тепловыделение.

Люминесцентные лампы дневного света имеют много недостатков, но два существенных достоинства:

- ✓ высокая эффективность (A++);
- ✓ низкое тепловыделение;
- × линейчатый спектр с континуумом;
- × присутствие линии в УФ;
- × высокий коэффициент пульсации (превышает нормы [2, 3]).

Компактные люминесцентные лампы имеют наихудшие характеристики, несмотря на заявления производителей, и обладают только одним достоинством:

- ✓ высокая эффективность (A, A+);
- × среднее тепловыделение;
- × линейчатый спектр;
- × присутствие линии в УФ;
- × высокий коэффициент пульсации (превышает нормы [2, 3]).

Отдельно следует отметить лампы с колбой типа «**рефлектор**». Такая форма влияет только на угол раствора диаграммы направленности и тем самым на площадь освещённости. Все остальные характеристики не отличаются от характеристик ламп соответствующего типа, в нашем случае это МГЛ. Лампы с таким цоколем хорошо использовать для освещения рабочей поверхности. Несмотря на то, что три исследованные МГЛ имели близкую потребляемую мощность, рефлекторная лампа обеспечивает большую площадь поверхности с освещённостью > 300 лк.

Литература

1. *Варфоломеева Л. П.* Энергоэффективное электрическое освещение. — М.: Издательский дом МЭИ, 2013.

2. СанПиН. 2.2.1/2.1.1.1278-03. — 2003.
3. СНиП. 23-05-2010. — 2010.
4. Сивухин Д. В. Общий курс физики. Т. 4. Оптика. — М.: Издательский дом МЭИ, 2005.
5. Елисеев Н. П., Решенов С. П. О предельных световых и цветовых характеристиках белых светодиодов. — М.: Светотехника, 2012.
6. ГОСТ. 8607-82. — 1982.
7. ГОСТ. 55702-2013 года (пункт 7.2.5). — 2013.
8. Murphy T. Maximum Efficiency of White Light. — Department of physics UC San Diego, 2011.
9. ГОСТ. 54350-2011 года (формула (5) в пункте 11.3 и формула (Д.4) в пункте Приложения Д). — 2011.

UDC 621.321

Comparative Analysis of Spectral-Photometric Characteristics of Domestic Sources of Light

I. Vasileska, M. A. Korneeva, V. P. Stepin

*Department of Applied Physics
Peoples' Friendship University of Russia
6, Miklukho-Maklaya str., Moscow, Russia, 117198*

Correct organization of artificial lighting is very important for creation comfortable living conditions in work places with significant eyestrain, as well as solving the problem of energy efficiency. The purpose of this study is to conduct a comprehensive experimental study of spectral, photometric and electrical characteristics of domestic light sources. Were identified the most and least energy-efficient different light sources in specific circumstances, as well as verification their conformity with the characteristics of the standards SanPiN.

In this work were studied incandescent lamps, metal halide, LED, fluorescent and compact fluorescent lamps. According to the results of direct measurements were determined: the directional patterns, the luminous fluxes and energy efficient classes of domestic light sources.

All experimental resultants have been summarized in a single table which allows comparing the characteristics of the studied domestic light sources. It was founded that measured values for some of the light sources differ from those stated by the manufacturer, which was noted in compact fluorescent lamps.

Analysis of the results allowed us to determine the feasibility of the specific light sources. The results will be useful for the specialists and manufacturers in lighting technology, as well as ordinary users.

Key words and phrases: the light sources, incandescent lamps, metal halide lamps, LED lamps, fluorescent lamps, compact fluorescent lamps, the emission spectrum, color temperature, illumination, directional patterns.

References

1. L. P. Valfrolomeeva, Energetic Efficiency of Electric Illumination, Publishing House MEI, Moscow, 2013, in Russian.
2. SanPin, 2.2.1/2.1.1.1278-03, 2003, in Russian.
3. SNiP, 23-05-2010, 2010, in Russian.
4. D. V. Sivukhin, General Course of Physics, Vol. 4. Optics, Fizmatlit, Moscow, 2005, in Russian.
5. N. P. Eliseev, S. P. Reshenov, The limit of light and color characteristics of white LEDs, Svetotekhnika, Moscow, 2012.
6. GOST, 8607-82, 1982, in Russian.
7. GOST, 55702-2013 (# 7.2.5), 2013, in Russian.
8. T. Murphy, Maximum Efficiency of White Light, Department of physics UC San Diego, 2011.
9. GOST, 54350-2011 (formula (5) in # 11.3 and formula (D.4) in Appendix D), 2011, in Russian.