

Деградация светодиодов: связь между условиями эксплуатации, реальным и декларируемым сроками службы

Д.Ю. ЮРОВСКИХ¹

Представительство компании Cree Hong Kong Limited, Москва

Аннотация

Статья касается вопроса срока службы светодиодов и светильников с ними. Предлагаются подходы к оценке срока службы и рассматриваются некоторые основные причины отказов этих изделий, зависящие от конкретных условий работы светодиодов. Даются рекомендации, на что стоит обращать внимание при оценке долговечности светильников со светодиодами.

Ключевые слова: светодиоды, срок службы, светильники со светодиодами, критерии отказа, *Electrical Overstress*.

Сегодня уже можно уверенно утверждать, что светодиодная революция в освещении свершилась. Светодиоды (СД) проникли, в частности, и в уличное освещение, и в офисное, и в торговое, и в бытовое, и в промышленное, и в сферу ЖКХ. Причин для этого несколько, и они достаточно известны.

Однако потребитель настороженно относится к заявляемым уровням надёжности и долговечности светильников с СД (ССД). Оно и неудивительно, ведь в таких сферах, как уличное, промышленное и торговое освещение, установка ССД – своего рода инвестиция, т.к. их использование окупается довольно медленно: как правило, не менее чем за год. И отказ ССД гораздо неприятнее, чем перегорание простой лампы, хотя бы потому, что замена лампы – относительно простой и освоенный процесс, с которым потребитель, в большинстве случаев, может справиться самостоятельно, тогда как замена или ремонт ССД – дело, требующее участия сервисной организации или производителя ССД. Это обусловлено тем, что понятие «лампа» как таковое к ССД зачастую неприменимо. При этом отказ

в рамках данной статьи, рассказать не только о свойствах и долговечности СД, но и о сроке службы всего ССД.

Под сроком службы светильника с традиционным источником света понимают время его работы до момента катастрофического отказа, т.е. полного прекращения функционирования, например, из-за «перегорания» источника света или «поломки» ПРА. В отношении ССД, как правило, применяют понятие «параметрический отказ». Это связано с тем, что в общем случае «перегорание» источника света в ССД не рассматривается. То есть когда говорят что срок службы белого СД, скажем, – 50 тыс. ч по уровню L70, то имеют в виду, что по истечении этого срока, СД продолжает функционировать, но его световой поток становится меньше 70% от номинального (начального) светового потока. Иными

ССД одинаково неприятен как пользователю, так и поставщику осветительного оборудования, на плечи которого ложатся заботы (и затраты) по замене или ремонту ССД. Поэтому, как производителям, так и потребителям необходимо понимать, что такое срок службы ССД и от чего он зависит. В связи с тем, что потребитель зачастую не сильно разграничивает понятия «СД» и «ССД», постараемся,

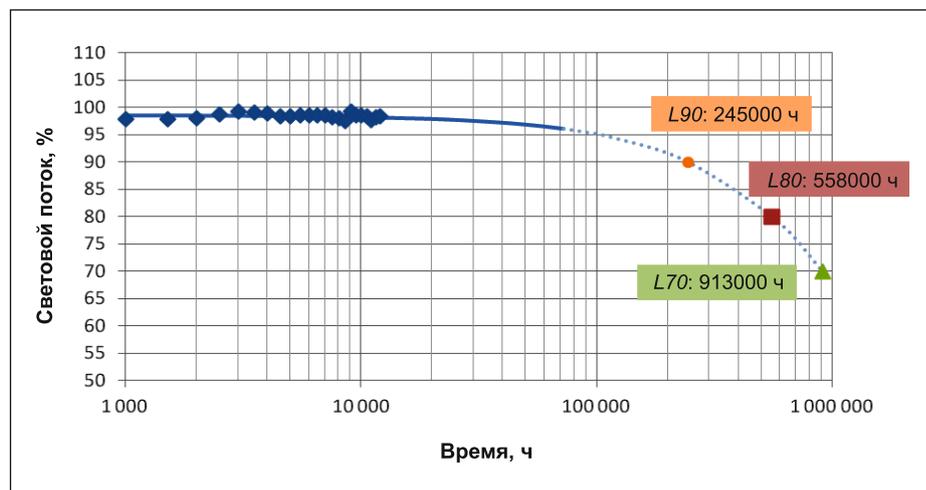


Рис. 1. Оценка срока службы светильника по спаду светового потока

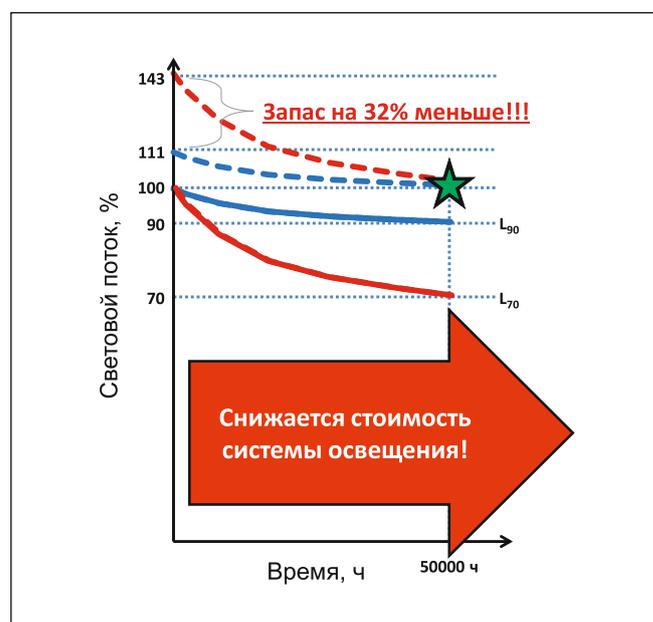


Рис. 2. Сравнение светильников с разными критериями оценки срока службы

¹ E-mail: Dmitry_Yurovskikh@cree.com

словами, проектировщикам осветительной установки (ОУ) необходимо знать, как долго ССД будут сохранять достаточно высокую долю от номинального (начального) светового потока, а не сколько времени пройдёт до выхода источника света из строя. Между прочим, некоторые производители СД сегодня уже рассматривают в качестве расчётного не общепринятый уровень в 70%, а более высокий – 80 или даже 90% (рис. 1).

И в этом есть свой резон, ведь если проектировщик рассчитывает уровень освещения на конец срока службы ОУ, то он должен предусмотреть запас по освещённости с самого начала. Поэтому при расчёте по уровню $L70$ изначальный запас должен составлять $(100/70-1) = 0,428$, т.е. около 43% от требуемой освещённости (рис. 2). А при расчёте по уровню $L90$ достаточен запас в $(100/90-1) = 0,111$, т.е. всего в 11%.

Таким образом, простое применение критерия $L90$ снижает необходимый изначальный запас по освещённости (световому потоку) на 32% (с 43 до 11%) и, соответственно, снижает коэффициент запаса (а следовательно, стоимость и мощность) ОУ. Вот такой интересный «побочный» эффект... [1]

Но вернёмся к сроку службы ССД. За него, в общем случае, принимается тот срок, при котором деградация (спад) светового потока ССД не превышает заданного значения. Известно, что для любого СД наиболее значимые показатели, определяющие его срок службы (скорость деградации) – температура и плотность тока кристалла. Причём оба параметра имеют чёткие верхние ограничения, обусловленные технологией производства СД². Существуют также ограничения совокупности этих факторов, т.е. скорость спада светового потока зависит от комбинации температуры и плотности тока кристалла.

В 2008 г. Североамериканское светотехническое общество (IES) предложило некую обобщённую методику измерений светового потока дис-

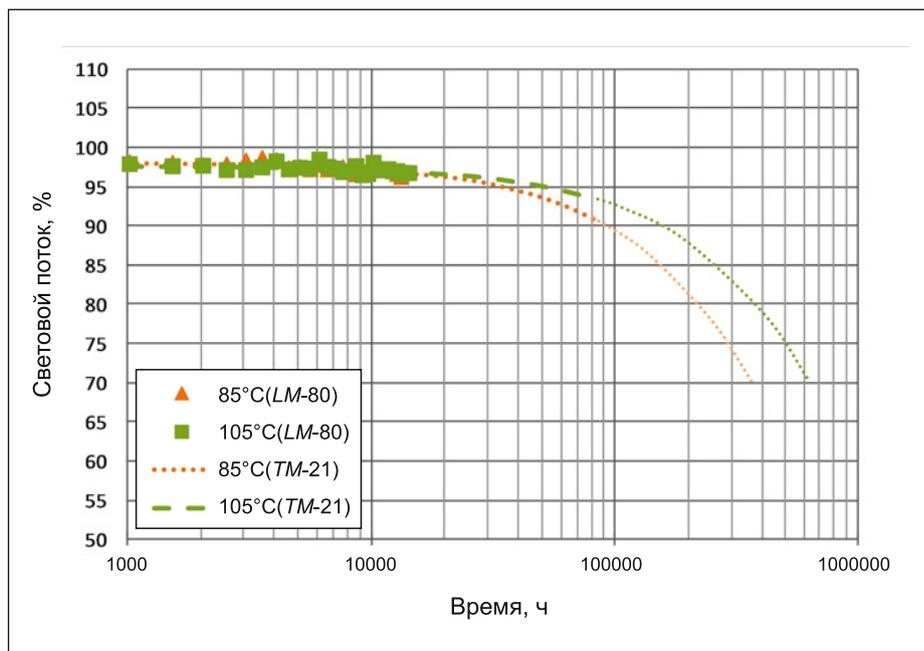


Рис. 3. График спада светового потока по результатам измерений по LM-80, экстраполяция и прогноз срока службы по TM-21

кретных СД, СД-матриц и отдельных СД-модулей – LM-80-08 [2], и на сегодня она является общепринятой для измерения динамики спада и значений светового потока. LM-80, в частности, требует от производителя наличия данных за период измерений, как минимум за 6000, а желательно, не менее чем за 10000 ч. Измерения проводят при нескольких значениях тока СД и регламентированных температурах в точке пайки (на выводе СД) – 55, 85 и выбранной производителем СД, например, 105 °С. Параллельно с этим IES предложило также методику измерений светового потока, входной мощности, распределения яркости и координаты цветности (КЦ) ССД – LM-79-08 [3]. Однако на основе этих методик можно только констатировать факт изменения (спада, деградации) светотехнических параметров СД или изделий с ними на момент измерения(ий), тогда как нас интересует достоверный прогноз спада светового потока для определения срока службы по выбранному нами уровню $L70$, $L80$ или $L90$. Для определения срока службы был разработан метод прогнозирования изменения светового потока во времени путём математической обработки данных, полученных по LM-80-08 – метод TM-21-11 [4, 5]. При этом, естественно, более поздние экспериментальные данные обеспечивают более точную экстраполяцию, чем более

ранние, поэтому при наличии данных за 6000–10000 ч измерения к расчёту принимаются данные за последние 5000 ч, а при более длительных измерениях – полученные за ещё более поздний период измерений. Поэтому стандарт предусматривает, что отчётный срок службы СД, СД-матрицы или отдельного СД-модуля не может превышать шестикратную длительность измерений³. Стоит учесть, что при разных комбинациях тока и температуры кристалла получаются разные сроки службы.

Но служит ли спад светового потока единственным критерием, определяющим «отказ» ССД? Конечно, нет. Второй важный критерий – это КЦ (да, именно координаты, а не коррелированная цветовая температура). Оказывается, КЦ тоже зависят от тока, температуры и времени. Причём этот тип отказа («по КЦ») гораздо видней, т.к. чувствительность че-

² Например, максимальная регламентированная рабочая температура кристалла, произведённого на кремниевой или сапфировой подложке, как правило, не превышает 125–135 °С, а произведённого на карбид-кремниевой подложке может достигать 150 °С.

³ Например, для СД Cree серии «XP-G2» имеются данные согласно рис. 3, полученные через 14112 ч в процессе измерений по стандарту LM-80 при токе 500 мА и температуре в точке пайки $T_{sp} = 105$ °С. Полученный расчётный срок службы по уровню $L90$ – более 233000 ч, но согласно TM-21 производитель может заявлять срок службы по $L90$ только 77600 ч, т.е. только в шесть раз превышающий период измерений (таблица).

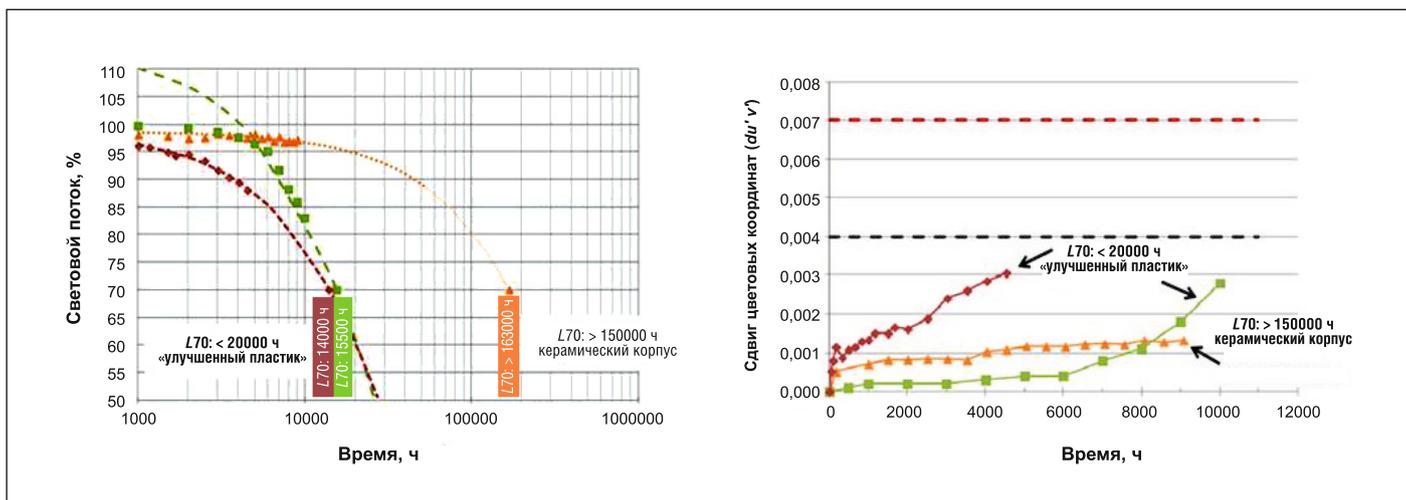


Рис. 4. Динамика спада светового потока и дрейф координат цветности при температуре в точке пайки $T_{sp}=105\text{ }^{\circ}\text{C}$

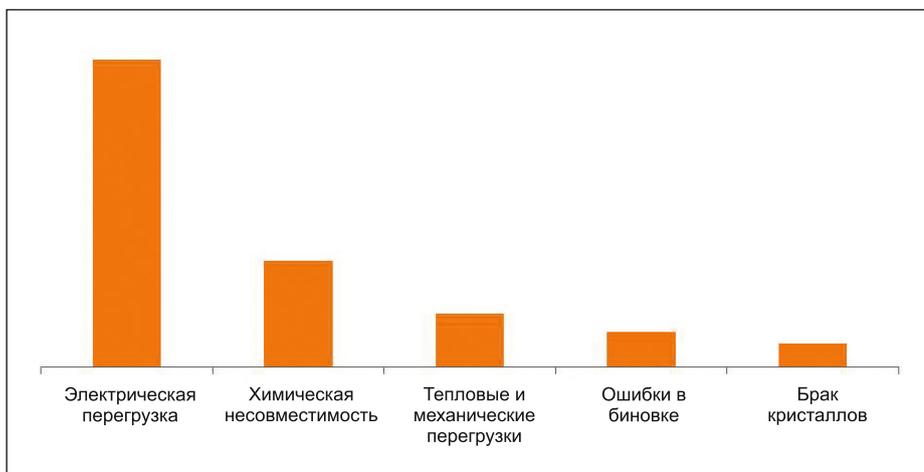


Рис. 5. Распределение причин отказов светодиодов в светильниках

ловека к цвету намного выше, чем к яркости. *LM-80* также предписывает измерение КЦ СД, СД-матриц и отдельных СД-модулей (но не готовых ССД) в течение не менее 6000 ч, но в нём ничего не говорится ни о допустимых сдвигах КЦ, ни о том, как экстраполировать результаты измерений. Единственно известный автору статьи международный стандарт, регламентирующий допустимый сдвиг КЦ – *Energy Star®* [7]. В нём определено, что КЦ не должны изменяться более чем на 0,007 (т.е. в пределах 7-шагового эллипса МакАдама⁴) в течение 6000 ч. В качестве базового этот стан-

⁴ Принято считать, что одношаговый эллипс МакАдама ограничивает область КЦ на цветовом графике x-y МКО, в которой человеческий глаз воспринимает цвета одинаковыми. Шаг Мак-Адама соответствует среднегеометрическому изменению КЦ u', v' на 0,001 на цветовом графике $u'-v'$.

дарт, возможно, приемлем, но в плане качественного света – т.к. срок службы современных СД намного больше 6000 ч – конечно, требуется более жёсткое регламентирование. При разработке критериев оценки срока службы СД необходимо иметь в виду, что для большинства людей изменение КЦ в пределах 2–3-шагового эллипса МакАдама (т.е. сдвиг КЦ на 0,002–0,003) остаётся незаметным [8].

Итак, мы определили, что считать отказом СД и какие данные производитель СД должен предоставлять для подтверждения заявленного срока службы. При этом производителю ССД надо чётко представлять, в каком именно температурном режиме будет работать его изделие и какова будет его температура в точке пайки (т.е. в месте контакта СД с печатной платой) при эксплуатации и др. Это очень важно, т.к. спад светового потока и смещение КЦ при высоких температурах очень сильно зависят от

технологии производства кристалла и материала корпуса СД. Например, СД с пластиковым корпусом, даже при использовании так называемого «улучшенного пластика», долго не выдерживают высоких температур – материал корпуса СД при этом меняет свою отражательную способность, и при высокой температуре кристалла световой поток СД может снизиться за 15000–16000 ч, а КЦ – выйти за пределы 2-шагового эллипса МакАдама (рис. 4). Методику измерения температуры в точке пайки можно найти, например, здесь: www.cree.com/xlamp_app_notes/solder_point_temp.

Но, и это ещё не всё. Дело в том, что, даже имея весь набор фотометрических характеристик по *LM-80* и *LM-79* и зная средний ток и температуру на СД, мы всё-таки не можем уверенно прогнозировать срок службы СД в ССД. Дело в том, что отказ СД может вызываться не только нарушением температурного режима. Даже, если тепловой режим нормален, существует ещё значительный набор факторов, могущих влиять на срок службы СД. Как видно из рис. 5, кроме несоблюдения температурных режимов, подавляющее большинство выявленных отказов вызывается электрической перегрузкой, называемой в англоязычной литературе *Electrical Overstress (EOS)* [9]. Это импульс, мощность которого превышает допустимый максимум для данного СД и имеет длительность 100–1000 нс (в отличие от электростатического разряда, длительность которого меньше: и находится в пределах 10^{-3} –10 нс. Повреждения СД, вызываемые *EOS*, могут быть и относитель-

Прогноз срока службы светодиода Cree «XPG2» при токе 500 мА и температурах в точке пайки T_{sp} 85 и 105°C

Ток	T_{sp}	Длительность теста, ч	α	β	Расчётный срок службы, ч	Отчётный срок службы (часов)		
						L90	L80	L70
500 мА	85°C	13608	9,148E-07	0,9798	>245000	>81600	>81600	>81600
	105°C	14112	5,271E-07	0,9762	>233000	>77600	>77600	>77600

но незаметны, и катастрофичны, т.е. приводят к полному отказу СД. Причём даже когда EOS вызывает слабые повреждения, но возникает неоднократно (например, если устройство управления (УУ) СД выдаёт периодически короткие токовые импульсы), то СД со временем приходит в негодность. Причинами EOS бывают переходные процессы, низкое напряжение пробоя печатной платы или УУ, ошибки в топологии печатной платы и компоновке ССД и т.п. И, конечно, вероятность отказа СД от EOS весьма температурозависима.

Ещё одна «популярная» причина отказа СД – химическая несовместимость. Часто СД используются со вторичной оптикой или закрываются герметично крышкой, и в таких случаях используется некий материал (клей или прокладка), обеспечивающий герметичность и (или) крепление оптики и защитной крышки. При нагреве в процессе эксплуатации, этот материал может выделять летучие вещества. При этом существует вероятность того, что, вступая во взаимодействие с силиконом, люминофором и корпусом СД, эти вещества изменяют свойства СД, вызвав снижение светового потока и сдвиг КЦ. Кроме того, если СД, например, с пластиковым корпусом или содержащие серебряные проводники будут использоваться в ССД, подверженным воздействию коррозионных газов, например сернистых, то такие СД также деградируют намного быстрее (как по световому потоку, так и по КЦ), чем СД с корпусом на керамической подложке.

Распространённая причина преждевременного отказа СД – его повреждение при монтаже на печатную плату или в процессе последующих операций со спаянным СД-модулем.

Кроме отказа или деградации СД, нельзя забывать и о том, что используемая оптика, рассеиватель или за-

щитная крышка (защитное «стекло»), также могут со временем, в процессе эксплуатации, менять свои оптические и физические свойства, что неизбежно влияет на светотехнические параметры ССД.

Говоря о сроке службы ССД, следует учитывать все параметры, влияющие как на деградацию СД, так и на срок службы ССД в целом. Для этого надо чётко знать, каковы температуры СД и УУ (особенно электролитических конденсаторов, как наиболее «слабого звена» в конструкции УУ), и оценивать температурный режим СД с учётом рабочего тока и имеющихся данных по *TM-21-11*. Кроме того, необходимы обязательные проверки процесса и качества пайки, а также химической совместимости используемых герметиков, теплопроводных материалов и клеев с используемыми СД. Разумеется, использование СД с пластиковым корпусом, должно настораживать, если речь идёт об уличных или промышленных ССД. Необходимо также проверять данные о: входном диапазоне напряжения УУ в ССД, т.к. чем шире диапазон напряжения, тем при больших колебаниях напряжения сети ССД будет работать стабильно; молниезащите – в соответствии с *EN61000-4-5*. Рекомендуется защита от кратковременных импульсов напряжения до 6 кВ и выше. Необходимы и данные о сроке службы УУ в том температурном режиме, в котором оно работает в данном ССД. Нужно обязательно проводить тесты на «горячее включение», пробой УУ, печатной платы и ССД, измерять пусковой ток и анализировать переходные процессы в ОУ. И, конечно, предоставляемые данные о параметрах УУ должны подтверждаться протоколами испытаний. В отдельных случаях целесообразно самостоятельно организовывать испытания образцов ССД в професси-

ональных испытательных лабораториях и центрах. Довольно подробные рекомендации по выбору надёжных ССД даны в публикации [10].

Выводы

Реальный срок службы как СД, так и ССД зависит от множества факторов. Вполне возможно, покупатель ССД не будет проводить тщательную проверку или требовать все необходимые документы, подтверждающие их заявленные надёжность и долговечность. Но производители и продавцы светотехнических изделий с СД просто вынуждены иметь всё это в виду и следовать рекомендациям, хотя бы для того, чтобы спокойно предоставлять гарантию на свои изделия и заключать энергосервисные контракты с уверенностью в получении прибыли.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Деградация светодиодов. Связь между условиями эксплуатации, реальным и прогнозируемым сроком службы / Доклад на открытой дискуссии Светотехнической торговой Ассоциации. URL: http://www.lta.ru/images/Presentations/%D0%A1%D0%A2%D0%90_%D0%BA%D1%80%D1%83%D0%B3%D0%BB%D1%8B%D0%B9_%D1%81%D1%82%D0%BE%D0%BB_2014-11.pdf (дата обращения: 02.04.2015).

2. Approved Method: Measuring Lumen Maintenance of LED Light Sources* + Addendum A. URL: <http://www.ies.org/store/product/approved-method-measuring-lumen-maintenance-of-led-light-sources-1096.cfm> (дата обращения: 02.04.2015).

3. Approved Method: Electrical and Photometric Measurements of Solid-State Lighting Products. URL: <http://www.ies.org/store/product/approved-method-electrical-and-photometric-measurements-of-solid-state-lighting-products-1097.cfm>

ies.org/store/product/approved-method-electrical-and-photometric-measurements-of-solidstate-lighting-products-1095.cfm (дата обращения: 02.04.2015).

4. Projecting Long Term Lumen Maintenance of LED Light Sources + Addendum. URL: <http://www.ies.org/store/product/projecting-long-term-lumen-maintenance-of-led-light-sources-1253.cfm> (дата обращения: 02.04.2015).

5. The elusive "life" of LEDs: How TM-21 contributes to the solution. URL: <http://www.ledsmagazine.com/articles/2012/11/the-elusive-life-of-leds-how-tm-21-contributes-to-the-solution-magazine.html> (дата обращения: 02.04.2015).

6. Cree XLamp Long-Term Lumen Maintenance. URL: http://www.cree.com/xlamp_app_notes/lumen_maintenance (дата обращения: 02.04.2015).

7. ENERGY STAR Luminaires Final Draft Version 1.0 Specification. URL: http://www.energystar.gov/sites/default/files/specs/Luminaires_V1_0_Final_Draft%20Specification.pdf (дата обращения: 02.04.2015).

8. Color Maintenance of LEDs in Laboratory and Field Applications. URL: http://apps1.eere.energy.gov/buildings/publications/pdfs/ssl/2013_gateway_color-maintenance.pdf (дата обращения: 02.04.2015).

9. Analysis on Failure Modes and Mechanisms of LED. URL: http://www.csa.org.cn/uploads/xiazai/lwj/ICRMS'2009/section_09/09-15.pdf (дата обращения: 02.04.2015).

10. «Коммюнике по результатам 2-го Круглого стола Светотехнической Торговой Ассоциации (СТА)» от 13.11.2014. URL: <http://www.lta.ru/index.php/novosti/46-communicate-2014> (дата обращения: 02.04.2015).



Юровских Дмитрий Юрьевич,
инженер-испытатель. Окончил в 1996 г. МАИ. Региональный менеджер по продажам Представительства компании Cree Hong Kong Limited, Москва



Международный форум по энергоэффективности и энергосбережению «ENES 2015»

19–21 ноября 2015, г. Москва, Гостиный двор

Минэнерго России официально начало подготовку крупнейшего в стране Международного форума по энергоэффективности и энергосбережению «ENES 2015». Соответствующий приказ главы министерства Александр Новак подписал 20 апреля.

Мероприятие, техническим оператором которого определён ОАО «Выставочный павильон «Электрификация», состоится в Москве в Гостином дворе с 19 по 21 ноября. К настоящему моменту сформирована рабочая группа по подготовке форума, которую возглавил заместитель министра Антон Инюцын. В её состав также вошли руководители профильных департаментов Минэнерго России, руководитель департамента топливно-энергетического хозяйства города Москвы Павел Ливинский, генеральный директор ОАО «Выставочный павильон «Электрификация» Владимир Затынайко.

В ходе исполнения приказа министра уже сформулированы ключевые темы деловой программы форума. Департамент энергосбережения и повышения энергетической эффективности Минэнерго России будет координировать организацию в рамках «ENES 2015» заседаний рабочих органов по вопросам энергосбережения и повышения энергетической эффективности межправи-

ТЕЛЬСТВЕННЫХ КОМИССИЙ, МЕЖДУНАРОДНЫХ ОРГАНИЗАЦИЙ И ОБЪЕДИНЕНИЙ. Кроме того, данный департамент непосредственно курирует конкурсную программу форума. В этом году её ключевыми событиями станут Всероссийский конкурс реализованных проектов в области энергосбережения и повышения энергоэффективности, традиционно проходящий в рамках «ENES», Первый всероссийский конкурс «МедиаТЭК» и конкурс на Евразийскую светотехническую премию в рамках «Международного года света и световых технологий». В 2015 году в рамках Форума впервые пройдёт Всероссийское совещание «О ходе подготовке субъектов электроэнергетики к отопительному сезону 2015–2016 годов», организацию которого традиционно осуществляет Департамент оперативного контроля и управления в электроэнергетике Минэнерго России.

Основные работы по обеспечению работы форума «ENES 2015», наполнению выставочной экспозиции, информационному и рекламному обеспечению события, организационно-технические задачи по подготовке мероприятия возложены на ОАО «Выставочный павильон «Электрификация».

<http://smartmetering.ru>
07.2015