

# Исследования спада светового потока светодиодных светильников «Энерком»

А.А. БАРЦЕВ, В.М. ПЯТИГОРСКИЙ,  
Р.И. СТОЛЯРЕВСКАЯ, А.С. ШАРАКШАНЭ

ООО «ВНИСИ им. С.И. Вавилова»  
E-mail: iva2000@gmail.ru

## Аннотация

Внедрение световых приборов со светодиодами в различные сегменты экономики требует чёткого представления всех проблем, связанных с решением глобальных задач освоения энергосберегающих технологий. Одно из важнейших преимуществ применения светодиодов в освещении — теоретическое прогнозирование их значительного срока службы. Работа посвящена экспериментальным исследованиям и прогнозированию срока службы конкретных светодиодных ОП на основе экспериментальных данных измерений стабильности их светового потока и цветовых характеристик. Проведены светотехнические и тепловые испытания промышленных светодиодных светильников типа NR-FLW70 производства «Энергоинжиниринговой компании «Энерком». Сравнены светотехнические параметры этих светильников, изъятых из осветительной системы предприятия, наработавших порядка 30 000 ч, и светильников той же партии с нулевым временем наработки. Определена стойкость параметров к повышенным температурам и выполнена оценка стабильности светотехнических параметров, спрогнозирован срок службы.

**Ключевые слова:** спад светового потока, срок службы  $L_{70}$ , коррелированная цветовая температура, КЦТ, температурный коэффициент, температура  $p-n$ -перехода, люминофор, деградация

## 1. Введение: тепловой режим и деградация СД ОП

Принципиально важную роль при проектировании СД ОП играет обеспечение их нормального теплового режима при эксплуатации. Известно, что большинство механизмов выхода СД из строя зависят от температуры. Превышенные температуры  $p-n$ -пе-

рехода СД ( $T_j$ ) — причина снижения светового потока СД и ускоренной деградации кристаллов. Максимальная температура  $T_j$  для каждой линии продукции указывается производителем в её технических данных. При этом  $T_j$  влияет, в частности, на световой поток  $\Phi_v$ , цветность излучения и прямое напряжение  $V_f$  на СД, а на саму  $T_j$  влияют, преимущественно, три показателя:

— температура окружающей среды (воздуха) в непосредственной близости к СД;

— степень лёгкости прохождения тепла между  $p-n$ -переходом и его окружением;

— потребляемая (и затем рассеиваемая) электрическая мощность СД ( $P_d$ );

При этом зависимость  $\Phi_v$  от  $T_j$  [°C] определяется выражением [1]

$$\Phi_v(T_2) = \Phi_v(T_1) \times \exp(-k \times \Delta T_j),$$

где  $\Phi_v(T_1)$  и  $\Phi_v(T_2)$  есть  $\Phi_v$  при  $T_j = T_1$  и  $T_2$  соответственно;  $k$  — температурный коэффициент,  $\Delta T_j = (T_2 - T_1)$ .

Типичные значения  $k$  для некоторых сверхъярких СД приведены в таблице 1.

Как следует из этого выражения, повышение  $T_j$ , например, с 25 до 100 °C снижает световой поток СД на основе *AllnGaP* (красные, красно-оранжевые, жёлтые) в среднем наполовину, тогда как на СД на основе *AllnGaN* или *InGaN* (синие, зелёные, белые) подобное влияние темпера-

туры существенно меньше (в пределах 7–8%).

Большинство люминофоров, используемых в СД, имеют тенденцию к постепенной потере эффективности, при этом механизмы этого процесса могут быть различны. Активаторы могут подвергаться изменению валентности (обычно окисление), кристаллическая решётка может деградировать, атомы — чаще активационные — диффундируют через матрицу, поверхность подвергается химическим реакциям с окружающей средой и т.д. Другой важный механизм, приводящий к потере квантовой эффективности люминофора, — перегрев. На рис. 1 приведено изменение квантовой эффективности при повышении температуры некоторых широко применяемых люминофоров.

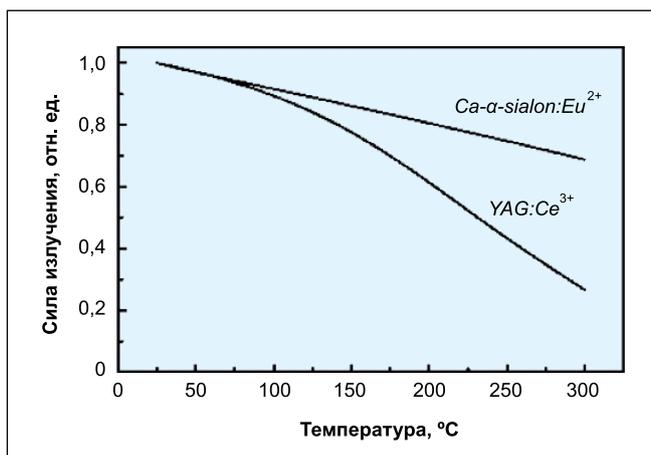
Обычно СД герметизируются оптически прозрачной эпоксидной смолой. При достаточно высокой температуре, называемой температурой стеклования (полимера)  $T_g$ , эпоксидные смолы переходят из твёрдого стеклообразного состояния в вязкотекучее. Как правило, с температурой  $T_g$  связано резкое изменение коэффициента теплового расширения (КТР) полимеров, и  $T_g$  определяют как среднюю точку температурного интервала, на котором указанное изменение произошло. Во избежание катастрофических разрушений корпусов СД следует всегда удерживать  $T_j$  ниже  $T_g$  эпоксидного (или иного) герметика. Поэтому приводимая производителями СД максимально допустимая  $T_j$  ( $T_{j, max}$ ) всегда ниже  $T_g$  используемого герметика. При этом большинством производителей СД в настоящее время для  $T_{j, max}$  даётся (125–135) °C, хотя и появились «первые ласточки» с  $T_{j, max}$  до 150 и даже 185 °C. При нарушении условия  $T_j \leq T_{j, max}$ , т.е. когда  $T_j > T_{j, max}$ , КТР эпоксидного гер-

Таблица 1

Температурный коэффициент  $K$  сверхъярких СД

Тип материала кристалла /цвет излучения /особенность подложки СД	$k, 1 / ^\circ\text{C}$
<i>AllnGaP</i> , красно-оранж., подложка поглощающая	$9,52 \cdot 10^{-3}$
<i>AllnGaP</i> , жёлтый, подложка поглощающая	$1,11 \cdot 10^{-2}$
<i>AllnGaP</i> , красно-оранж., подложка прозрачная	$9,52 \cdot 10^{-3}$
<i>AllnGaP</i> , жёлтый, подложка прозрачная	$9,52 \cdot 10^{-2}$
<i>AllnGaN</i> , синий	$9,5 \cdot 10^{-4}$

Рис. 1. Изменение силы излучения при повышении температуры [2]



метика начинает непрерывно и быстро расти. А большой КТР влечёт более сильные термические расширение и сжатие, влекущие, в частности, более сильные перемещения проводочного соединения внутри корпуса СД и, как следствие, преждевременный износ и разрушение этого соединения (что означает полный отказ работы СД). Безусловно, каждый из компонентов современных сверхъярких светодиодов может в определённый момент дать сбой, и причины этому могут быть разные — от низкого качества используемого материала до неверного изначального дизайна. И всё же, как уже упоминалось выше, наибольшая вероятность повреждения, деградации или отказа связана с неверными электрическим или термическим (суть, электрическим) условиями использования.

## 2. Испытываемые светильники

Светильники типа *NR-FLW 70* производства «Энергоинжиниринговой компании «Энерком» предназначены для освещения промышленных предприятий и складских территорий, цехов и технологических помещений, стоянок и строительных площадок, наружной подсветки зданий и рекламных конструкций, городских и придомовых территорий, объектов социально-культурной сферы.

### 2.1. Необходимость прогноза стабильности светового потока

Длительность покрытого гарантией срока службы данного светильника недостаточна для принятия решения о выборе оборудования. К концу срока службы осветительная система должна обеспечивать нормативные

уровни освещённости. Меньшая скорость спада светового потока даст основание использовать меньший запас по освещённости при проектировании и позволит сократить расходы на электроэнергию, большая — позволит предусмотреть при проектировании дополнительные меры для сохранения необходимых уровней освещённости. Но отсутствие информации о скорости спада светового потока не позволит обосновать использование данного оборудования при проектировании системы.

### 2.2. Метод прогноза стабильности светового потока

Методика определения скорости спада светового потока выполнена с учётом стандарта *IES LM-80* [3], разработанного Светотехническим обществом Северной Америки. При оценке рабочего ресурса ОП использовались методы, предложенные разработчиками стандарта *IES TM-21* [4]. На основе экспоненциального закона спада светового потока во времени:

$$\Phi(t) = \Phi_0 \exp(-\alpha t),$$

где  $\Phi_v(t)$  — световой поток,  $\Phi_0$  — его начальное значение,  $\alpha$  — константа скорости спада светового потока.

При известном изменении светового потока за время  $\Delta t$ , прошедшего от момента наработки первой 1000 ч, константа скорости спада светового потока оценивается по формуле

$$\alpha = \frac{-\ln \frac{\Phi}{\Phi_0}}{\Delta t}$$

Оценка времени снижения светового потока до уровня  $L_x$ :

$$L_x = 1000 + \frac{\ln x / 100}{-\alpha}$$

Для аппроксимации рекомендуется использовать не менее 20 образцов, со временем наработки не менее 6000 ч. Причём, фотометрическими данными за первую тысячу часов эксплуатации, в течение которых световой поток, практически, не спадает и может даже несколько возрасти, так как идет не характеризующие дальнейший период эксплуатации переходные процессы, предписывается пренебречь.

Однако мы имеем возможность использовать для аппроксимации экспериментальные данные зависимости светового потока от времени наработки для светильников, эксплуатировавшихся в цеху предприятия в течение 30000 ч. Также есть возможность воспользоваться фотометрическими данными за время дополнительного отжига не бывшего в эксплуатации светильника в течение 1000 ч, что позволит в соответствии с правилами *TM-21* пренебречь фотометрическими данными за время установления переходных процессов. Значения светового потока для аппроксимации берутся через 1000 и через 30000 ч.

Вместо 20 образцов используются только четыре. Замена данных полученных в лаборатории для одного светильника на результаты измерений нескольких разных светильников из одной партии, проработавших разное время вносит в интерполированные результаты ошибку, обусловленную малым числом точек измерения и разбросом световых потоков светильников одной партии. Методы *TM-21* предполагают проводить испытания при двух различных фиксированных температурах кристалла и расчётным методом определять скорости снижения светового потока для других значений температуры. Мы же имеем данные о работе светильника в условиях реального применения в цеху на производстве. Соответственно, прогноз стабильности светового потока нами сделан для этих же типичных условий применения.

### 2.3. Температурный анализ

Методика *LM-80* предписывает измерение параметров светодиодов в лабораторных условиях при ста-

бильных параметрах окружающей среды и при максимальном значении температуры точки пайки светодиодов 85 °С.

При ошибках конструирования теплопроводящего тракта осветительного прибора со светодиодами кристаллы и люминофор могут эксплуатироваться в условиях повышенных температур, что ведёт к повышенной скорости деградации и особенностям спада светового потока, которые не могут быть учтены при расчёте по методикам *ТМ-21*. Соответствие температур СД в ОП установленным производителем рабочим значениям и не превышение 85 °С для точки пайки — условие корректности использования методик *ТМ-21* и надёжности прогноза временной стабильности параметров.

Источник света в светильниках *NR-FLW70* — светодиодный *СОВ*-модуль. Производитель не задал точки пайки и процедуры измерения. Однако есть возможность оценивать температуру кристалла и люминофора методом измерений прямого напряжения и светового потока. Условие не превышения температуры кристалла 85 °С является более жёстким, чем не превышение этой же пороговой температуры точки пайки, и гарантирует приемлемость температурного режима работы СД модуля.

Также конструкция светодиодного модуля допускает прямое измерение температуры люминофора.

#### 2.4. Светильники, изъятые для испытаний

Светильники *NR-FLW70* с серийными номерами 23718, 23772, 23777 (рис. 2, а) изъятые из осветительной системы помещения «Цех розлива» предприятия ООО «Пивоваренная компания «Балтика», филиал «Балтика-Воронеж» (рис. 3), по протоколу № 201601261 от 26 января 2016 г. Данные светильники в соответствии с Актом о сдаче-приёмке выполненных работ от 9 августа 2012 г. установлены на объекте и работали в круглосуточном режиме (акт предприятия), наработав за 1265 дней эксплуатации 30360 ч.

Для сравнения взят светильник *NR-FLW70* с серийным номером 35278 с нулевым временем наработки, изъятый со склада предприятия (рис. 2, б).



Рис. 2. Светильники, изъятые из осветительной системы (а), светильник, изъятый со склада хранения (б)



Рис. 3. Процедура изъятия светильников *NR-FLW70* с серийными номерами 23718, 23772, 23777 для испытаний из осветительной системы цеха

##### 2.4.1. Технические параметры светильника, заявленные производителем

В светильнике соединено последовательно 7 модулей, в каждом из которых имеется последовательно-параллельное соединение 160 кристаллов (рис. 4) с общим прямым

напряжением 6,2 — 6,4 В. Заявленная предельная рабочая температура кристалла — 125 °С.

Номинальный ток светильника — 1600 мА. Предельное заявленное значение силы тока для одного кристалла — 60 мА, что соответствует 4,8 А для модуля.

Результаты первичных измерений светового потока ОП

№ светильника	23718	23772	23777	35278
Время наработки, ч	30000			0
Световой поток, лм	5930	5950	6040	7470
Мощность, Вт	74,4	74,9	75,5	74,6

Данные для светильника № 23777

Наработка, ч	Световой поток в%
1000	100,0
31360	81,1

Таблица 3

Результаты измерений светового потока после дополнительного непрерывного отжига 1000 ч

№ светильника	Время работы, ч	Световой поток, лм
35278	1000	7510
23777	31360	6090

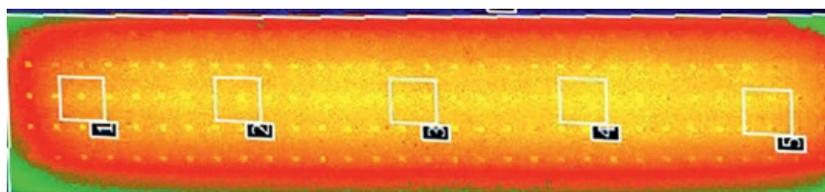


Рис. 4. Изображение, полученное с помощью яркомера-колориметра на основе ПЗС-матрицы, иллюстрирующее расположение кристаллов в светодиодном модуле

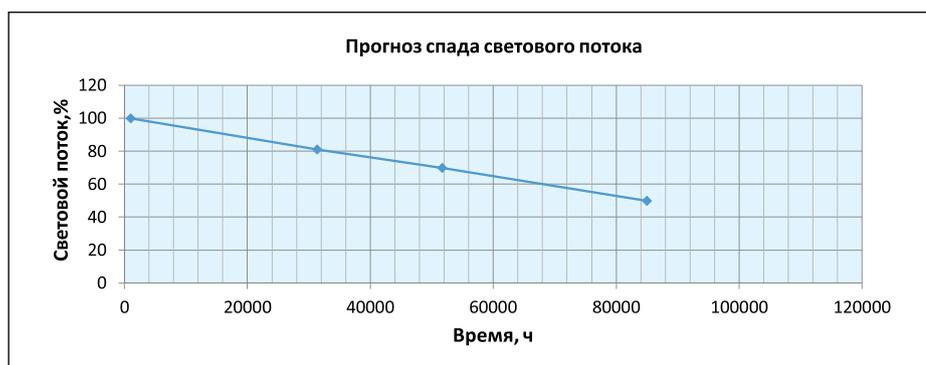


Рис. 5. Прогноз спада светового потока

## 2.5. Методика выполнения температурного анализа

Для целей контроля параметров светильника, включенный в тепловую схему светильника источник работает в штатном режиме, являясь источником постоянного тока для СД модуля другого светильника. А ток на СД модули испытываемого светильника подается от лабораторного источника.

### 2.5.1. Методика измерений

– Выбираются два бывших в эксплуатации светильника, определяют-

ся испытываемый светильник и тот, который играет при измерениях вспомогательную роль.

– Термопара крепится на основной корпусной детали испытываемого светильника.

– Источник питания испытываемого светильника подключается к СД модулю второго светильника. Светодиодные модули испытываемого светильника подключаются к лабораторному источнику тока при номинальном для светильника токе 1600 мА. Обеспечивается возможность записи в реальном времени тока и напряжения на модулях основного светильника.

– Светильники размещаются в рабочем положении в камере тепла. На светодиодные модули испытываемого светильника подаются номинальный ток и одновременно рабочее напряжение на источник питания основного светильника. Выполняется запись прямого напряжения во время прогрева светильника и запись изменения светового потока (в относительных единицах) при прогреве светильника.

– Температуру в климатической камере поднимают до предельной рабочей температуры светильника, равной 50 °С. Фиксируется изменение прямого напряжения, изменения относительного светового потока и прямого напряжения на СД модулях при прогреве светильника. Измерения повторяют при снижении температуры в камере до нижней предельной рабочей температуры, равной –60 °С.

– В момент включения, и после прогрева светильника, а также при всех устоявшихся значениях рабочей температуры измеряют КЦТ и пропорциональную световому потоку освещенность от окна камеры.

– На основании полученных данных определяется температурный коэффициент изменения прямого напряжения и прогнозируется температура кристалла при прогреве светильника до предельной рабочей температуры.

– Светильник прогревается при комнатной и предельной температуре, контактным методом каждый раз определяется температура люминофора.

## 2.6. Результаты испытаний

Результаты измерений светового потока всех изъятых с производства светильников приведены в табл. 2. Для получения дополнительной информации о спаде светового потока с учетом времени наработки СД, два светильника были включены 24 ч в сутки с целью измерения светового потока после 1000 ч работы. Результаты измерений приведены в табл. 3.

Разброс световых потоков светильников после наработки более 30 000 ч составляет порядка 2%, что является признаком высокой воспроизводимости характеристики внутри партии и даёт основание принять столь же незначительным разброс значений светового потока и для не эксплуатирувавшихся светильников. Для оценки константы  $\alpha$  использованы фотометрические данные для светильника с серийным номером 23777, имеющего максимальный срок горения (табл. 4).

Оценка константы скорости снижения светового потока  $\alpha$ :

$$\alpha = \frac{-\ln \frac{\Phi}{\Phi_0}}{\Delta t} = \frac{-\ln \frac{81,1\%}{100\%}}{30360} = 6,9 \cdot 10^{-6}.$$

$$\Phi(t) = \Phi_0 \exp(-6,9 \cdot 10^{-6} t).$$

Прогноз спада светового потока в зависимости от времени горения представлен на рис. 5.

Время снижения светового потока до 70% от начального значения  $L_{70}$  составит

$$L_{70} = \frac{\ln 0,7}{-\alpha} = 51692 \text{ ч.}$$

На рис. 6 представлена зависимость спада светового потока от температуры окружающей среды, которую можно аппроксимировать формулой:  $\Phi_v(T) = -0,1897 \times T(^{\circ}\text{C}) + 105,3, \%$ , что означает снижение светового потока на 0,19% при повышении температуры на 1 °C, или на 4,7% при повышении температуры окружающей среды от 25 °C до (предельной рабочей) 50 °C. На левой границе рабочих температур световой поток, наоборот, на 16% выше, чем при 25 °C. При прогреве светильника при комнатной температуре освещённость в плоскости измерения снижается на 4,3%, что, вероятно, соответствует прогреву кристалла от момента включения до выхода на устойчивый тепловой режим 23 °C.

С ростом температуры КЦТ растёт (рис. 7) с коэффициентом 1,2, что означает рост КЦТ на 1,2 К при увеличении температуры окружающей среды на 1 °C. Также это означает повышение КЦТ на 30 К при увеличении температуры окружающей среды с номинального значения 25 °C до предельной рабочей температуры 50 °C и уменьшение на 102 К при

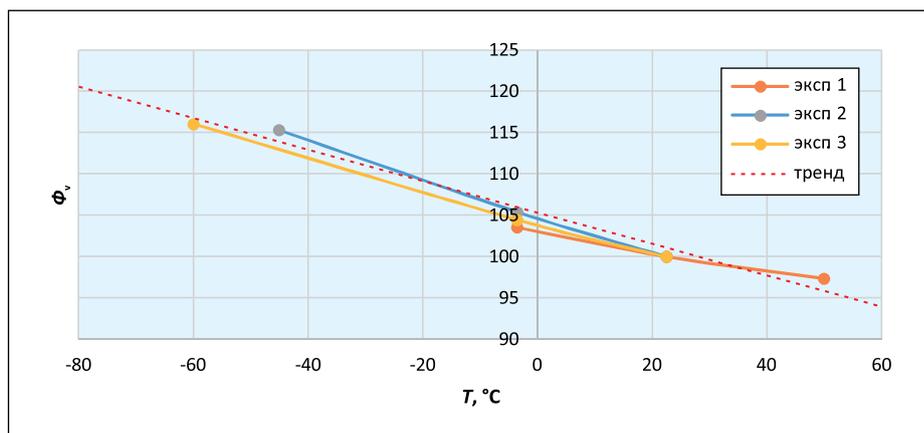


Рис. 6. Зависимость светового потока  $\Phi_v$  от температуры окружающей среды  $T$

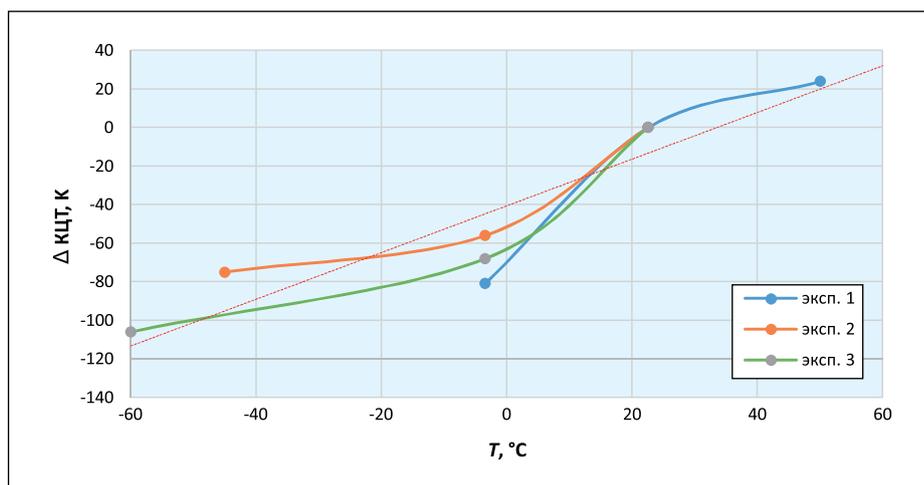


Рис. 7. Изменение КЦТ с ростом температуры окружающей среды  $T$

снижению температуры до предельной нижней рабочей температуры минус 60 °C.

Изменение температуры окружающей среды от -60 до +50 °C не приводит к значимому отклонению цветности свечения. КЦТ остаётся в пределах допустимых отклонений от заданной номинальной цветности из ряда типовых значений по ГОСТ Р 54350–2015.

Результаты прямого измерения температуры корпуса светильника и люминофора контактным методом представлены на рис. 8. Температура корпуса на 21 °C выше температуры окружающей среды, а температура люминофора – на 26 °C. При максимальной рабочей температуре окружающей среды 50 °C температура корпуса составляет 71 °C, температура люминофора 76 °C. Это более чем на 30 °C ниже предельной рабочей температуры современных коммерчески доступных СД, и меньше назначенного предельного значения 85 °C по *LM80*.

На рис. 9 представлена зависимость прямого напряжения от температуры окружающей среды. С ростом температуры прямое напряжение падает с температурным коэффициентом 0,041 В/°C.

Среднее значение снижения прямого напряжения при прогреве кристаллов от комнатной температуры составило 0,678 В, что соответствует прогреву кристалла на 16 °C. При предельной рабочей температуре окружающей среды 50 °C температура кристалла в соответствии с оценкой методом измерения прямого напряжения составляет 66 °C. Данный метод может давать заниженное значение температуры кристалла в связи с неточностью измерения прямого напряжения в момент включения светильника.

## Выводы

Рост температуры кристаллов СД модуля при прогреве и выходе на устойчивый тепловой режим светиль-

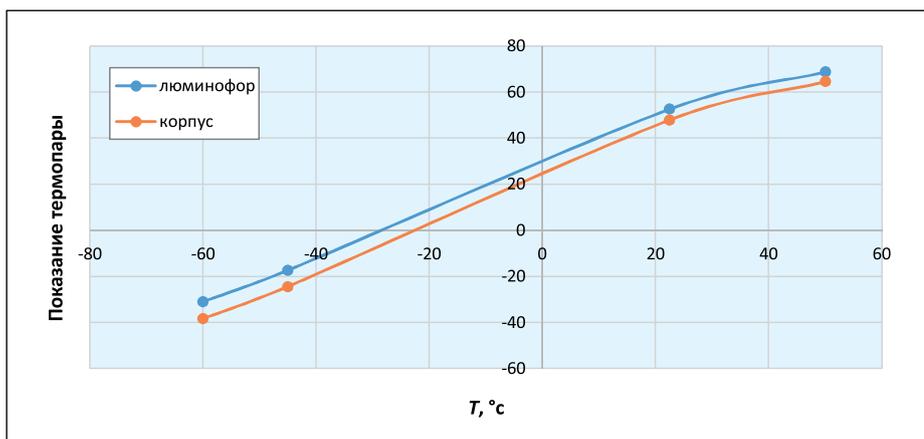


Рис. 8. Результаты прямого измерения температуры контактным методом на корпусе светильника и на люминофоре при разной окружающей температуре  $T$

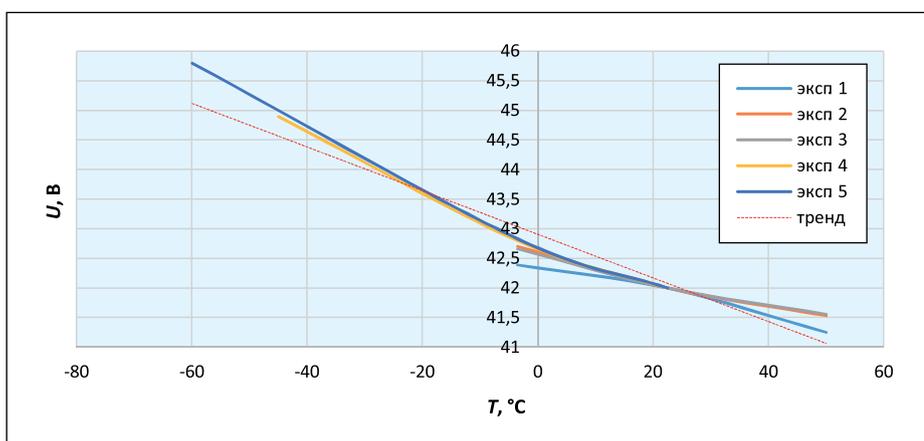


Рис. 9. Зависимость прямого напряжения на СД модулях светильников от температуры окружающей среды  $T$

ника оценён несколькими методами: метод измерения зависимости прямого напряжения от температуры прогнозирует минимальную цифру  $16\text{ }^{\circ}\text{C}$  и требует доработки, метод измерения спада светового потока показывает различие в  $23\text{ }^{\circ}\text{C}$ , контактный метод демонстрирует  $26\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Даже наиболее пессимистичная оценка температуры кристалла при максимальной рабочей температуре окружающей среды  $50\text{ }^{\circ}\text{C}$  будет составлять менее  $85\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Это свидетельствует о приемлемом тепловом режиме работы светильника, а также позволяет использовать данные о стабильности светового потока, полученные при работе в полевых условиях, для интерполяции, что хорошо согласуется с техническими характеристиками, заявленными производителями кристаллов (разница между температурой окружающей среды и температурой р–n-перехода составляет порядка  $25\text{ }^{\circ}\text{C}$ ).

Более  $50\,000$  ч до снижения светового потока на  $30\%$  – хороший результат для промышленного све-

тильника, работающего в условиях реального производства. Этот результат полностью согласуется с результатами исследований производителя кристаллов типа *ES-CEBLVIOL*, компании *EPSTAR*, используемых в светильниках типа *NR-FLW70* компании «ЭНЕРКОМ» до 2015 г. С 2015 г. светильники *NR-FLW70* производятся на основе чипов *S-30HBMUP-D* компании *SANAN OPTOELECTRONICS*, которые имеют прогноз по сроку службы  $L_{70}$  – более  $70\,000$  ч. Учитывая большой опыт проектировщиков компании «ЭНЕРКОМ» в создании конструкций светильников с оптимальным отводом (рассеянием) тепла на переходе, мы имеем реальный шанс приобретения ОП с ресурсом порядка  $70\,000$  ч до допустимого уровня светового потока  $70\%$  от номинала.

Выполненные исследования показали необходимость разработки и внедрения отечественных нормативных материалов (стандартов и методик) для определения ресурсных ха-

рактеристик современных световых приборов и необходимость оснащения испытательных центров соответствующим оборудованием.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Хайнц Р., Вахтманн К. Неорганические светодиоды. Обзор // Светотехника. – 2003. – № 3. – С. 7–13.
2. Xie, Rong-Jun (2007). «Silicon-based oxynitride and nitride phosphors for white LEDs. A review». Sci. Technol. Adv. Mater. 8: 588.
3. IES LM-80–08 Approved Method: Measuring Lumen Maintenance of Led Lighting Sources
4. IES TM-21 Projecting Long Term Lumen Maintenance of LED Light Sources



**Барцев Алексей Анатольевич**, кандидат техн. наук. Окончил в 1986 г. МЭИ. Руководитель Испытательного центра ООО «ВНИСИ»



**Пятигорский Владимир Михайлович**, кандидат техн. наук. Окончил МЭИ. Главный конструктор ООО «ВНИСИ». Лауреат Государственной премии РФ



**Столяревская Раиса Иосифовна**, доктор техн. наук. Окончила в 1968 г. физический факультет Казанского государственного университета. Научный редактор ООО «Редакция журнала «Светотехника», старший менеджер ООО «ВНИСИ». Представитель Российского национального комитета МКО в Отделении 2 МКО



**Шаракшанэ Антон Сергеевич**, кандидат физ.-мат. наук. Выпускник физического факультета МГУ им. Ломоносова 2001 г. В настоящее время сотрудник ВНИСИ им. С.И. Вавилова и кафедры «Светотехника» ФГОУ ВПО «НИУ «МЭИ»