

**БЕЛОРУССКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ**

Объект авторского права  
УДК 628.98:536.621+621.3.032-047.37

**САВКОВА**  
**Татьяна Николаевна**

**КОМПЛЕКСНАЯ ОЦЕНКА  
ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ И СВЕТОТЕХНИЧЕСКОЙ  
ХАРАКТЕРИСТИК ХОЛОДНО-БЕЛЫХ  
СВЕТОДИОДОВ В ОСВЕТИТЕЛЬНЫХ УСТРОЙСТВАХ**

Автореферат диссертации  
на соискание ученой степени кандидата технических наук  
по специальности 05.11.01 – приборы и методы измерения

Минск, 2023

Научная работа выполнена в учреждении образования «Гомельский государственный технический университет имени П.О. Сухого»

Научный руководитель: **Колесник Юрий Николаевич**, кандидат технических наук, доцент, директор института повышения квалификации и переподготовки учреждения образования «Гомельский государственный технический университет имени П. О. Сухого»

Официальные оппоненты: **Гусинский Александр Владимирович**, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры инфокоммуникационных технологий учреждения образования «Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники»;

**Трофимов Юрий Васильевич**, кандидат технических наук, директор Республиканского научно-производственного унитарного предприятия «Центр светодиодных и оптоэлектронных технологий Национальной академии наук Беларуси»

Оппонирующая организация: Государственное научное учреждение «Институт прикладной физики Национальной академии наук Беларуси»

Защита состоится «30» июня 2023 г. в 14<sup>15</sup> на заседании совета по защите диссертаций Д 02.05.17 при Белорусском национальном техническом университете по адресу: 220013, г. Минск, пр. Независимости, 65, корп. 1, ауд. 202, тел. ученого секретаря (+37517) 293 96 18, e-mail: D.02.05.17@bntu.by.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Белорусского национального технического университета.

Автореферат разослан «24» мая 2023 г.

Ученый секретарь совета по защите диссертаций, кандидат технических наук



Н. Н. Ризноокая

© Савкова Т. Н., 2023

© Белорусский национальный технический университет, 2023

## ВВЕДЕНИЕ

В условиях повсеместного использования искусственного освещения остро стоит вопрос о высокоэффективных источниках света (ИС), способных удовлетворить спрос на освещение при минимальных затратах электроэнергии. При этом следует отметить, что затраты на создание новых генерирующих мощностей значительно превосходят затраты на снижение мощности систем электрического освещения.

В Республике Беларусь создано производство светильников на основе импортной светодиодной элементной базы и материалов. На этапе проектирования светодиодных устройств необходимо решать многопараметрическую задачу по выбору производителя, единичной мощности светодиодов (СД) и их количества, напряжения и тока инжекции СД, эффективности, размеров радиатора, типа драйвера, срока службы и стоимости. При проектировании осветительных устройств существует огромное многообразие возможных конструкторских решений, что существенно расширяет задачи поиска оптимальных решений и обуславливает целесообразность моделирования работы СД при различных режимах работы.

Эффективной следует считать такое светодиодное устройство, которое создает высококачественное освещение и сохраняет свои характеристики на протяжении длительной работы при наименьших капитальных затратах, наибольшем сроке службы и минимальном энергопотреблении.

Одним из направлений деятельности при решении задач по проектированию и производству эффективных светодиодных осветительных приборов является определение оптимальных режимов работы СД. Ввиду отсутствия собственного производства СД данное направление представляется актуальным для нашей страны.

Проблемам расчета световых приборов с заданными характеристиками посвящены работы многих известных отечественных и зарубежных ученых: Ю. Б. Айзенберга, Ж. И. Алферова, В. В. Трембача, А. Э. Юновича, Э. М. Гутцайта, Ф. Е. Шуберта и др. Мировые разработки в области оптимизации режимов работы СД в основном решают задачи обеспечения теплового режима, производства эффективных оптиче-

ских систем и т. д. Разработчиками National Semiconductors представлен программный продукт Webench Led Architect для моделирования электрических цепей, который позволяет анализировать переходные процессы и варьировать тепловое сопротивление радиаторов, ток, рабочую температуру СД и их количество.

Однако все вышеперечисленные работы не решают задачи по определению эффективных режимов работы за счет уменьшения составляющей стоимости световой энергии, снижения тепловых потерь светотехнических устройств и использования источников питания с различными характеристиками на стадии проектирования светодиодных осветительных устройств или модернизации существующих.

## **ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ**

### **Связь работы с крупными научными программами и темами**

Тема диссертации соответствует подразделу 1.6 (энергосбережение, энергоэффективные технологии) перечня приоритетных направлений фундаментальных и прикладных научных исследований Республики Беларусь на 2011–2015, 2016–2020, утвержденных постановлениями Совета Министров Республики Беларусь от 19.04.2010 № 585 и от 12.03.2015 № 190.

Диссертационная работа выполнялась в ГГТУ им. П. О. Сухого в соответствии с темой «Разработка макетов, моделирование светодиодных осветительных приборов на основе удаленных преобразователей и изучение их характеристик» ГПНИ «Химические технологии и материалы, природно-ресурсный потенциал», подпрограмма «Химические технологии, реагенты и материалы», 2014–2015 гг., шифр ГР 20141924 от 20.08.2014.

### **Цель и задачи исследования**

Цель исследования заключается в развитии научно-методических основ повышения энергетической эффективности холодно-белых СД.

Для достижения поставленной цели потребовалось решить следующие задачи:

– проанализировать и оценить взаимосвязи между основными параметрами холодно-белых СД, разработать уточненный критерий

стоимости световой энергии для установления эффективного режима работы холодно-белых СД осветительных устройств;

– разработать метод и конструкции устройств для определения рассеиваемой мощности, светового излучения, температуры кристалла и теплового сопротивления холодно-белых СД;

– разработать методику определения остаточного ресурса светодиодных осветительных устройств путем анализа тепловых и энергетических характеристик;

– разработать методику определения энергетических и оптических характеристик СД при работе на постоянном и импульсном токе инжекции для определения оптимального режима работы светодиодных осветительных устройств при их проектировании;

– исследовать синтезированные люминофорные покрытия для создания перспективных конструкций светодиодных осветительных устройств и разработать методические рекомендации по совершенствованию высокоэффективных светодиодных устройств с удаленными преобразователями.

**Объект исследования:** холодно-белые СД, светодиодные модули, люминофорные покрытия, используемые для производства осветительных устройств.

**Предмет исследования:** методы и методики определения энергетических и оптических характеристик (потребляемая, рассеиваемая, излучаемая мощности СД, световой поток, тепловая энергия, температура кристалла, тепловое сопротивление (ТС), энергия светового и теплового излучения, коэффициент полезного действия (КПД)) холодно-белых СД и светодиодных матриц (СДМ), спектрально-люминесцентные свойства новосинтезированных люминофорных материалов.

Решение перечисленных выше задач выполнялось путем теоретического анализа, методами вычислительного и натурального экспериментов, аппроксимации экспериментальных данных и математического моделирования.

### **Научная новизна**

Научная новизна работы заключается в следующем:

– предложен уточненный критерий стоимости световой энергии для установления эффективного режима работы холодно-белых СД

на этапе проектирования осветительного устройства, который позволяет повышать КПД, снижать температуру кристалла СД и стоимость световой энергии;

– впервые предложен метод определения тепловых характеристик холодно-белых СД, энергии светового излучения и КПД с помощью интегрального и сухого калориметров;

– впервые предложена методика учета остаточного ресурса СД осветительных устройств с непрерывным контролем электрических и тепловых параметров СД в процессе эксплуатации и использованием зависимости срока службы СД от этих параметров, что позволяет своевременно выявлять износ СД и предотвращать ущерб от несвоевременного выхода из строя светодиодных осветительных устройств;

– предложены методические рекомендации по совершенствованию высокоэффективных светодиодных устройств с удаленными преобразователями, основанные на впервые установленной закономерности влияния размеров и количества диффузно-рассеивающего компонента кварца на квантовый выход люминесценции новосинтезированных люминофорных покрытий, полученных с применением наноструктурированного порошка иттрий-алюминиевого граната, легированного церием.

На способ измерения энергии тепловых потерь при испытании полупроводниковых СД, разработанный по предложенным в диссертации принципам, получен патент на служебное изобретение Республики Беларусь.

На световой прибор повышенной эффективности на основе СД и калориметры, разработанные по предложенным в диссертации принципам, получены четыре патента на полезную модель Республики Беларусь.

### **Положения, выносимые на защиту**

1. Уточненный критерий стоимости световой энергии, учитывающий коэффициент полезного действия и среднюю температуру кристалла светодиода, что позволяет установить эффективный режим работы и обеспечить повышение коэффициента полезного действия светодиодов в осветительных устройствах не менее чем на 10 %.

2. Метод определения рассеиваемой мощности холодно-белых светодиодов, отличающийся использованием в качестве средств измерения калориметра, который позволяет определять температуру кристалла, тепловое сопротивление, энергию светового излучения, коэффициент полезного действия и удешевить измерения более чем в 2,3 раза по сравнению с существующими аналогами при сохранении погрешности измерений в допустимых пределах.

3. Методика учета остаточного ресурса светодиодов осветительного устройства, отличающаяся непрерывным контролем их электрических и тепловых параметров в процессе эксплуатации и учетом зависимости срока службы светодиодов от средней температуры кристалла, что позволяет определять остаточный ресурс с погрешностью не более 5 % и своевременно выявлять износ светодиодов в реальных условиях эксплуатации.

4. Методические рекомендации по совершенствованию высокоэффективных светодиодных осветительных устройств с удаленными преобразователями, основанные на впервые установленной закономерности влияния размеров и количества диффузно-рассеивающего компонента кварца на квантовый выход люминесценции наноструктурированного порошка иттрий-алюминиевого граната, легированного церием, позволяющие повысить квантовый выход люминесценции на 10–15 %.

#### **Личный вклад соискателя**

Изложенные в диссертации основные результаты и положения были получены при выполнении заданий в соответствии с темой «Разработка макетов, моделирование светодиодных осветительных приборов на основе удаленных преобразователей и изучение их характеристик» ГПНИ «Химические технологии и материалы, природно-ресурсный потенциал», подпрограмма «Химические технологии, реагенты и материалы», 2014–2015 гг., шифр ГР 20141924 от 20.08.2014. Научные и практические результаты диссертации, положения, выносимые на защиту, разработаны и получены лично соискателем или при его непосредственном участии.

Анализ полученных результатов проводился совместно с научным руководителем кандидатом технических наук, доцентом Ю. Н. Колесником на всех этапах выполнения диссертационной ра-

боты, а также на отдельных этапах исследования – кандидатом физико-математических наук, доцентом А. И. Кравченко, которые оказывали практическую помощь и консультации.

### **Апробация результатов диссертации**

Результаты исследований, вошедшие в диссертацию, прошли апробацию на следующих научных собраниях: XIV МНТК «Современные проблемы машиноведения» (г. Гомель, ГГТУ им. П. О. Сухого, 2022), VIII МНПК «Перспективы инновационного развития угольных регионов России» (г. Прокопьевск, филиал КузГТУ, 2022), XIII МНТК «Современные проблемы машиноведения» (г. Гомель, ГГТУ им. П. О. Сухого, 2020), 9-я МНТК «Приборостроение – 2016» (г. Минск, БНТУ, 2016), МНТК «Обеспечение безопасности жизнедеятельности: проблемы и перспективы» (г. Гомель, ГИИ МЧС РБ, 2013–2015), XI–XV МНТК «Исследования и разработки в области машиностроения, энергетики и управления» (г. Гомель, ГГТУ им. П. О. Сухого, 2011–2015), республиканская научная конференция «Актуальные вопросы физики и техники» (г. Гомель, ГГУ им. Ф. Скорины, 2014), IX МНТК «Современные проблемы машиноведения» (г. Гомель, ГГТУ им. П. О. Сухого, 2012), МНТК «Чрезвычайные ситуации: теория и практика» (г. Гомель, ГИИ МЧС РБ, 2013), МНТК «Прикладные и фундаментальные исследования» (Сент-Луис, Миссури, США (2014, 2017, 2020)), республиканская научно-практическая конференция «Естественные науки – базис подготовки специалиста для органов и подразделений по ЧС» (г. Гомель, ГИИ МЧС РБ, 2014).

### **Опубликование результатов диссертации**

Основные результаты работы опубликованы в 38 печатных работах (общим объемом 7,9 авторского листа), включая: 11 статей в научных журналах согласно Перечню научных изданий Республики Беларусь для опубликования результатов диссертационных исследований (всего 4,2 авторского листа), 22 доклада в трудах конференций, в том числе 2 тезиса доклада (всего 3,7 авторского листа), патент на изобретение и 4 патента на полезную модель Республики Беларусь.

### **Структура и объем диссертации**

Диссертация включает в себя перечень сокращений и условных обозначений, введение, общую характеристику работы, основную часть, состоящую из пяти глав, заключение, библиографический список и семь приложений. Библиографический список занимает 17 страниц, включает 175 пунктов и разбит на список используемых



источников (137 наименований) и список публикаций соискателя ученой степени (38 наименований). Общий объем диссертационной работы составляет 194 страниц. Текст диссертации содержит 39 рисунков и 9 таблиц на 38 страницах, 7 приложений на 85 страницах.

## ОСНОВНАЯ ЧАСТЬ

**Первая глава** посвящена анализу характеристик светодиодных ИС. Установлено, что следует учитывать случайный характер распределения характеристик СД, которые кроме этого зависят от температуры окружающей среды.

Отмечено, что при проектировании светотехнических устройств на основе СД, исходя из анализа предъявляемых к ним требований, необходимо решать многопараметрическую задачу, что требует проводить моделирование работы СД при различных токах и температурах.

Анализ существующих способов определения средней рассеиваемой мощности (температуры активной области и теплового сопротивления) СД показал, что большинство из них являются косвенными, контактными, требующими калибровочных измерений и дорогостоящего оборудования.

Показано, что для повышения энергетического КПД светодиодных осветительных устройств целесообразно рассмотреть возможность определения эффективных режимов работы СД.

Во **второй главе** предложен уточненный критерий стоимости световой энергии для установления эффективного режима работы холодно-белых СД осветительного устройства.

Для установления такого режима определены электрические, тепловые и светотехнические характеристики (рисунок 1).

На рисунке 1 приведены следующие параметры:

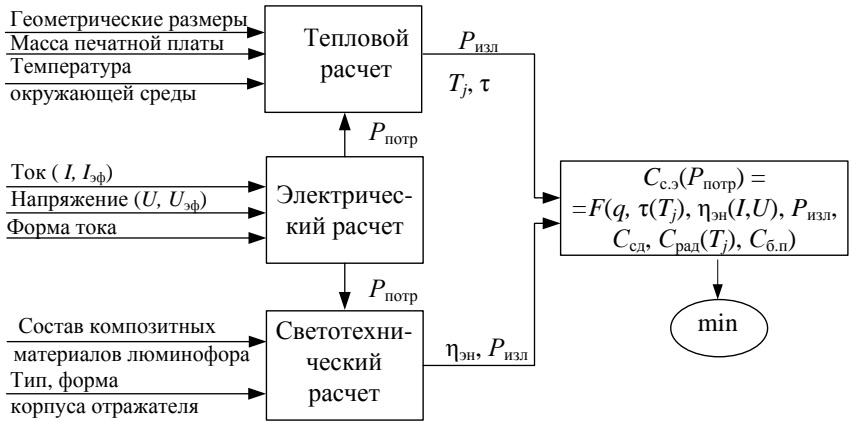
$C_{с.э}$  – стоимость световой энергии;

$P_{потр}$  – потребляемая мощность;

$q$  – тариф на электрическую энергию;

$\eta_{эн}$  – КПД СД;

$I$ ,  $I_{эф}$  – ток инжекции и эффективное значение тока инжекции соответственно при постоянном и импульсном возбуждении СД;



**Рисунок 1 – Схема определения параметров режима работы холодно-белых СД осветительного устройства**

$U, U_{эф}$  – падение напряжения на СД и эффективное значение напряжения соответственно при постоянном и импульсном возбуждении СД;

$P_{изл}$  – излучаемая мощность СД;

$\tau$  – срок службы СД;

$T_j$  – температура кристалла СД;

$C_{сд}, C_{рад}, C_{б.п}$  – соответственно стоимости светодиодов, радиатора и блока питания.

Для измерения тепловых характеристик СД и СДМ предложен метод определения рассеиваемой мощности СД с помощью калориметра на разработанной экспериментальной установке.

Для определения светового потока СД и СДМ при работе на импульсном и постоянном токе инжекции разработан испытательный фотометрический стенд.

В процессе проведения исследований для определения эффективного режима работы СД осветительного устройства предложен уточненный критерий стоимости световой энергии и рассмотрены различные существующие оценочные критерии, область применения и расчетные выражения которых представлены в таблице 1.

Таблица 1 – Расчетные формулы для определения критериев оценки осветительных устройств

Область применения критерия оценки	Формула для расчета критерия
Сравнение эффективности осветительных установок (И. Н. Козырева, В. Д. Никитин)	<p>Стоимость световой энергии:</p> $C_{с.э} = q\eta_v^{-1} + C_{и.с} (\Phi_{и.с} \tau)^{-1} + C_{с.п} (\Phi_{с.п} \eta_{с.п} t T)^{-1}, \quad (1)$ <p>где <math>\eta_v</math> – световая отдача;</p> <p><math>C_{и.с} (C_{с.п})</math> – стоимость источника света (стоимость светового прибора);</p> <p><math>\Phi_{и.с}</math> – световой поток источника света;</p> <p><math>\eta_{с.п}</math> – КПД светового прибора;</p> <p><math>t</math> – число часов работы светового прибора, ч;</p> <p><math>T</math> – срок службы светового прибора.</p> <p>Стоимость световой энергии:</p> $C_{с.э} = q\eta_v^{-1} + C_{и.с} (\Phi_{и.с} \tau)^{-1} \quad (2)$
Сравнение эффективности облучательных установок (В.Д. Никитин, К. В. Горошкина)	<p>Стоимость световой энергии:</p> $C_{с.э} = q\eta_{и.с}^{-1} + C_{и.с} (P_{и.с} \eta_{и.с} \tau)^{-1}, \quad (3)$ <p>где <math>\eta_{и.с}</math> – КПД источника света;</p> <p><math>P_{и.с}</math> – мощность источника света</p>
Сравнение ИС для осветительных установок (В. Л. Вязигин)	<p>Стоимость световой энергии:</p> $C_{с.э} = q\Phi_{и.с} T \eta_{и.с}^{-1} \quad (4)$
Оптимизация режима работы СД светильника по минимуму массы радиатора СД устройства (Е. В. Вставская)	<p>Стоимость светильника:</p> $C = C_{сд} n + C_{рад}, \quad (5)$ <p>где <math>n</math> – число светодиодов в светотехническом устройстве</p>

В работах И. Н. Козырева, В. Д. Никитина, В. Л. Вязигина, К. В. Горошкиной в качестве критерия оценки эффективности осветительных установок использовалась стоимость световой энергии без учета температуры кристалла СД.

В работах Е. В. Вставской в качестве оценочного критерия стоимости светильника (выражение (5)) предложено рассмотрение стоимости СД и радиатора осветительного устройства, которое учитывает температуру контакта СД с теплоотводящим основанием, потребляемый ток, рабочую температуру СД. Однако рассматриваемый критерий не учитывает КПД и зависимость срока службы СД от температуры кристалла, что не позволяет определить параметры оптимального режима работы СД в светотехническом устройстве и полностью использовать преимущества СД.

Для определения эффективного режима работы СД осветительного устройства (см. рисунок 1), а также сравнения различных осветительных устройств на основе холодно-белых СД, было предложено использовать уточненный критерий стоимости световой энергии  $C_{с.э}$  (6):

$$C_{с.э} = \frac{q}{\eta_{эн}(I, U)} + \frac{\sum_{i=1}^n C_{сдi} + C_{рад}(T_j) + C_{б.п}}{\sum_{i=1}^n P_{излi} \tau(T_j)}, \quad (6)$$

где  $\sum_{i=1}^n C_{сдi}$  – суммарная стоимость СД или массивов СД;

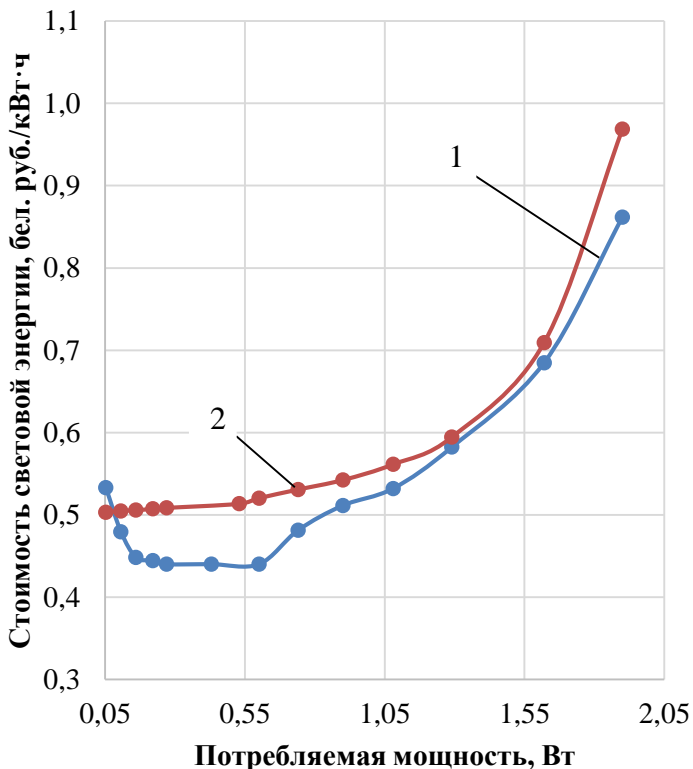
$\sum_{i=1}^n P_{излi}$  – суммарная мощность излучения СД светодиодного устройства;

$n$  – количество СД в световом приборе.

В качестве примера использования предлагаемого критерия рассмотрен вариант осветительного устройства на основе холодно-белых СД.

Для установления эффективного режима работы СД осветительного устройства определена и представлена на рисунке 2 зависи-

мость стоимости световой энергии от режима работа макета осветительного устройства с холодно-белыми СД ARPL-1W White 6000 (кривая 1).



**1** – с учетом изменения функции энергетического КПД от напряжения и тока инжекции  $\eta_{ЭН}(I, U)$  СД; **2** – с учетом постоянного значения КПД СД в номинальном режиме

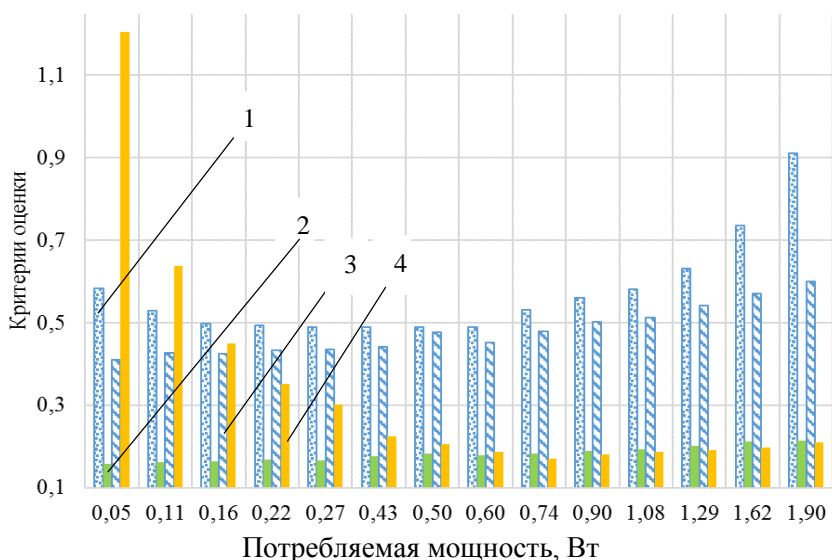
**Рисунок 2** – Зависимости стоимости световой энергии от потребляемой мощности макета осветительного устройства с холодно-белыми СД ARPL-1W White 6000

Для обоснования связи энергетического КПД СД и стоимости световой энергии СД осветительной установки на рисунке 2 представлены зависимости стоимости световой энергии от потребляемой

мощности макета осветительного устройства с холодно-белыми СД ARPL-1W White 6000 с учетом зависимости энергетического КПД от напряжения и тока инжекции (кривая 1) и с учетом постоянного значения параметра  $\eta_{\text{нн}} = 45,5 \%$ , который характеризует номинальный режим работы СД (кривая 2)

Из рисунка 2 видно, что в интервале потребляемой мощности от 0,27 до 0,6 Вт стоимость световой энергии макета СД устройства минимальна (кривая 1) и определяет эффективность устройства и оптимальный режим его работы.

Для сравнения критериев, представленных в таблице 1, с предложенным критерием по выражению (6) выполнена оценка их значений на всем диапазоне потребляемой мощности СД ARPL-1W White 6000. Результаты их сравнения представлены на рисунке 3 в виде гистограмм.



**1 – по формуле (6); 2 – по формуле (2);  
3 – по формуле (3); 4 – по формуле (5)**

**Рисунок 3 – Гистограммы критериев оценки эффективности осветительных установок в зависимости от потребляемой мощности СД макета светодиодного устройства (МСУ)**

Из гистограмм видно (см. рисунок 3), что рассматриваемый вариант светодиодного устройства на основе уточненного критерия стоимости световой энергии будет работать в эффективном режиме с минимальным значением стоимости световой энергии в диапазоне потребляемой мощности СД от 0,27 до 0,6 Вт.

Минимальное значение критерия по выражению (5) обеспечивается при потребляемой мощности 0,74 Вт, а по выражению (6) – 0,6 Вт, что обеспечивается за счет более высокого значения энергетического КПД СД и учета влияния температуры кристалла на увеличение массы и стоимости радиатора осветительного устройства.

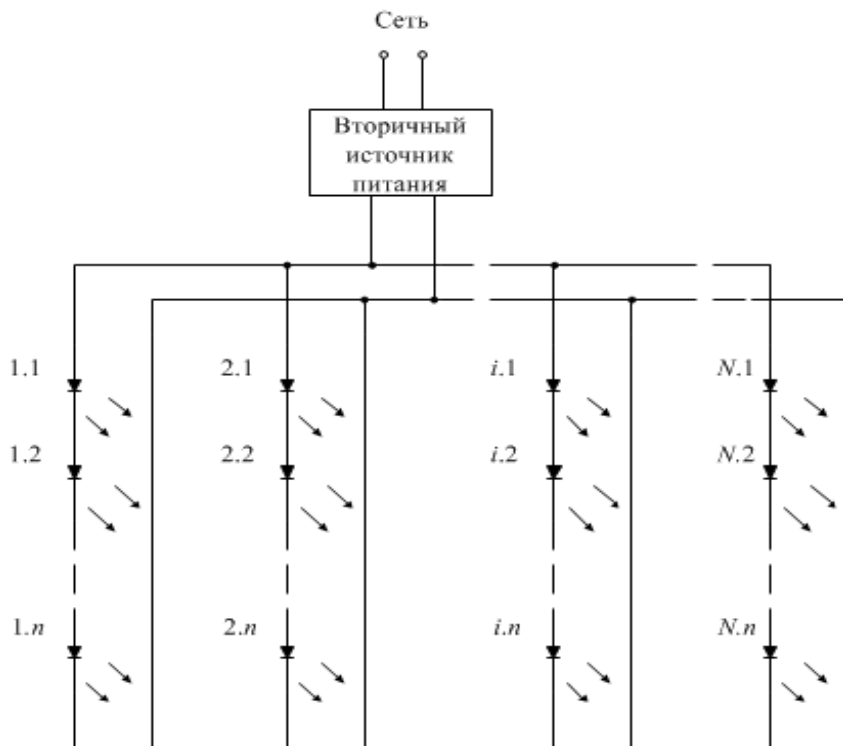
В свою очередь, расчет критерия стоимости световой энергии по выражениям (2) и (3) показывает, что данный параметр растет с увеличением потребляемой мощности. Поэтому данные критерии позволяют проводить сравнение эффективности осветительных устройств, но не позволяют определять эффективный режим работы СД осветительного устройства.

Из вышеизложенного следует, что в настоящей работе предложен уточненный критерий стоимости световой энергии, позволяющий установить эффективный режим работы СД осветительного устройства.

С целью апробации предлагаемого уточненного критерия стоимости световой энергии определен эффективный режим работы холодно-белых СД осветительного устройства на базе проекта МСУ на основе холодно-белых СД с потребляемой мощностью 30 Вт (рисунок 4).

Для определения зависимости стоимости световой энергии от потребляемой мощности СД ARPL-1W White 6000 МСУ в эффективном и номинальном режимах определялись следующие параметры (см. рисунок 1):  $\eta_{ЭН}(I, U)$ ,  $\tau(T_j)$ ,  $P_{потр}$ ,  $\sum_{i=1}^n P_{излi}$ ,  $\sum_{i=1}^n C_{сдi}$ ,  $C_{рад}(T_j)$ ,  $C_{б.п.}$ . В расчетах тариф на электроэнергию принимался равным 0,2092 руб./кВт·ч.

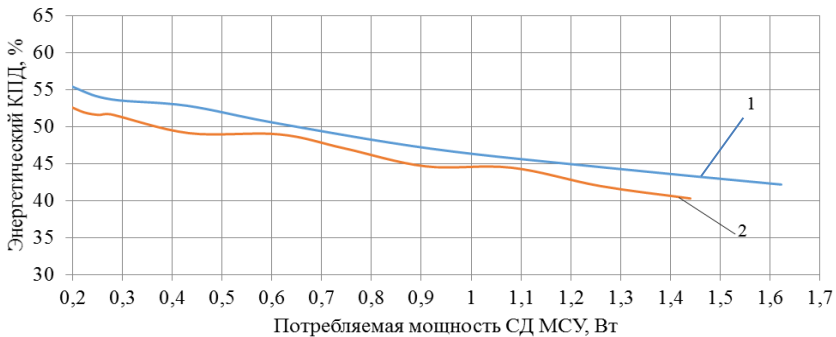
В разработанном МСУ в качестве источника питания может быть использован как источник постоянного тока, так и импульсный источник питания, но при работе на импульсном токе инжекции КПД СД ARPL-1W White 6000 ниже, чем при возбуждении постоянным током (рисунок 5).



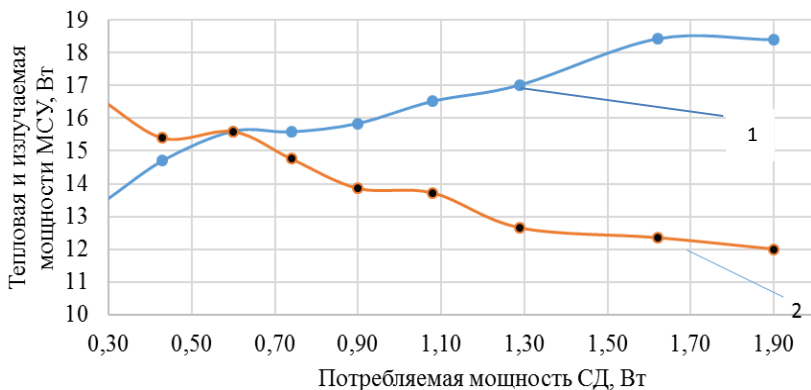
**Рисунок 4 – Схема МСУ на основе СД ARPL-1W White 6000**

Зависимости тепловой (кривая 1) и излучаемой (кривая 2) мощности МСУ от потребляемой мощности холодно-белым СД ARPL-1W White 6000 представлены на рисунке 6. Из рисунка следует, что мощность излучения МСУ с холодно-белыми светодиодами уменьшается с ростом потребляемой мощности единичным СД (кривая 2), а тепловая мощность увеличивается (кривая 1). Изложенное подтверждается увеличением стоимости световой энергии (см. рисунок 2).





**1 – при постоянном токе инжекции;  
2 – при импульсном токе инжекции**  
**Рисунок 5 – Зависимости энергетического КПД от потребляемой мощности**



**Рисунок 6 – Зависимости тепловой (1) и излучаемой (2) мощности МСУ от потребляемой мощности холодно-белым СД ARPL-1W White 6000**

В результате на основе уточненного критерия стоимости световой энергии (см. формулу (6)) определен эффективный режим работы СД МСУ (см. таблицу 2, рисунки 2, 5), характеризующийся током инжекции единичного СД, равным 0,21 А, средней температурой кристалла СД, равной 42 °С, и потребляемой мощностью 0,6 Вт. В этом режиме КПД СД в МСУ состав-

ляет 52,15 % (см. таблицу 2, рисунки 2, 5) или 15,5 Вт излучаемой мощности из 30 Вт, потребляемой МСУ, что больше на 14,6 % относительно номинального режима работы СД.

Таблица 2 – Результаты расчета стоимости единицы световой энергии СД МСУ мощностью, равной 30 Вт

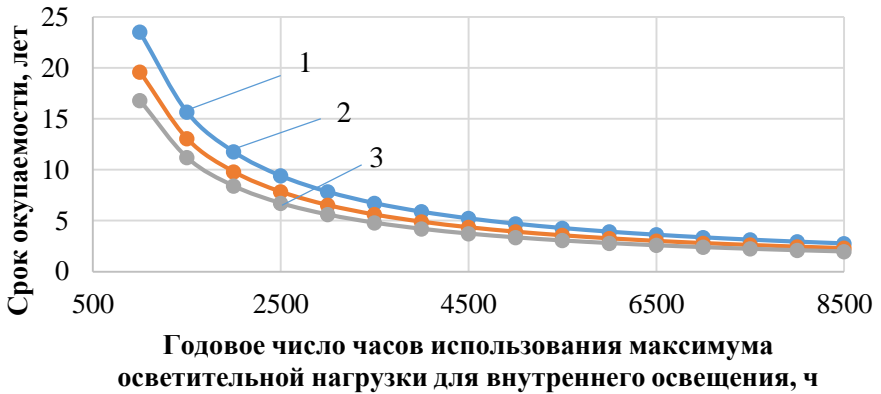
Режим работы СД ARPL-1W White6000 МСУ (30 Вт)	Параметры СД									
	$P_{изл}$ , Вт	$n$ , шт.	$C_{сд}$ , руб.	$C_{рад}$ , руб.	$\eta_{эн}$ , %	$T_j$ , °С	$P_{потр}$ , Вт	$I$ , А	$U$ , В	$C_{с.э}$ , руб./Вт·ч
Номинальный	0,47	30	1,96	42,5	45,5	56	1,0	0,33	3,08	0,53
Эффективный	0,31	50	1,96	37,4	52,15	42	0,6	0,21	2,93	0,44

Следует также отметить, что световой поток МСУ с ARPL-1W White 6000 при эффективном режиме составляет 4960,5 Лм, что на 451,5 Лм больше, чем при номинальном режиме работы СД. Световая отдача СД МСУ в этом случае составила 165,43 Лм/Вт, что на 15,3 Лм/Вт больше, чем при номинальном режиме работы СД.

Для определения области использования предлагаемого уточненного критерия стоимости световой энергии были построены зависимости срока окупаемости дополнительных капиталовложений в МСУ от годового числа часов использования максимума осветительной нагрузки  $T_m$ , характеризующего интенсивность его работы (рисунок 7).

Из рисунка 7 видно, что для организаций и предприятий, работающих с 2-, 3-сменным режимом работы (с изменением параметра  $T_m$  от 3500 до 4500 ч), срок окупаемости дополнительных капиталовложений в МСУ будет составлять не более 5–7 лет.

**В третьей главе** представлен метод определения рассеиваемой мощности холодно-белыми СД с помощью калориметра. В разработанных конструкциях колориметров основным элементом являлся блок, на котором располагался СД (или СДМ), помещенный в теплоотводящую среду, заполняющую корпус калориметра. Оптическое и тепловое излучение с поверхности СД выводилось за его пределы через отверстие в крышке калориметра. В качестве теплоотводящей среды использовались вода, стекловата, пенопласт, воздух.

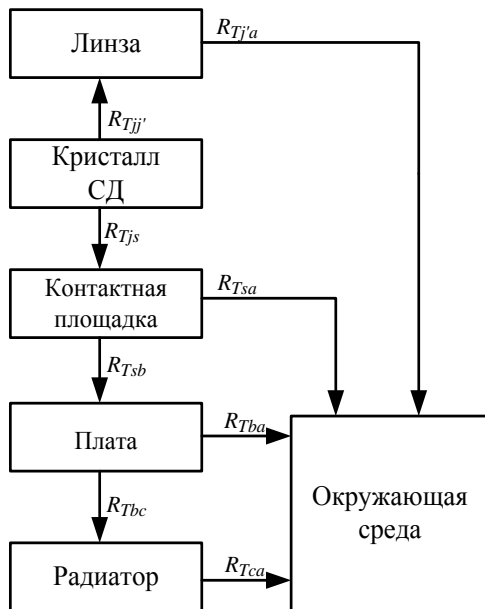


1 – МСУ с СД ARPL-3W White 6000; 2 – МСУ с СД ARL2-5313WC;  
3 – МСУ с СД ARPL-1W White 6000

**Рисунок 7 – Зависимости срока окупаемости дополнительных капиталовложений в МСУ от годового числа часов использования максимума осветительной нагрузки**

Для определения величины температуры кристалла наиболее нагретой точки СД разработана тепловая схема замещения светодиодного устройства по аналогии с методом однородных тел, когда изучаемый объект разбивается на относительно небольшое количество элементов с заданными тепловыми характеристиками (рисунок 8).

Каждый структурный элемент светодиодного устройства на рисунке 8 представлен как тепловое однородное тело: линза, кристалл СД, контактная площадка, плата, радиатор, окружающая среда. Обозначим сопротивления между ними:  $R_{Tij}$  – тепловое сопротивление «линза – кристалл»;  $R_{Tj'a}$  – тепловое сопротивление «линза – окружающая среда»;  $R_{Tjs}$  – тепловое сопротивление «кристалл – контактная площадка»;  $R_{Tsa}$  – тепловое сопротивление «контактная площадка – окружающая среда»;  $R_{Tsb}$  – тепловое сопротивление «контактная площадка – плата»;  $R_{Tba}$  – тепловое сопротивление «плата – окружающая среда»;  $R_{Tbc}$  – тепловое сопротивление «плата – радиатор»;  $R_{Tca}$  – тепловое сопротивление «радиатор – окружающая среда».



**Рисунок 8 – Структурная схема тепловых процессов светодиодного устройства**

На основании предложенной структурной схемы (см. рисунок 8) составлена система дифференциальных уравнений тепловых процессов для светодиодного устройства (7):

$$\left\{ \begin{array}{l}
 C_j \frac{dT_j}{dt} + \frac{T_j - T_s}{R_{Tjs}} + \frac{T_j - T_{j'}}{R_{Tjj'} + R_{Tj'a}} = P_{\Sigma}; \\
 C_s \frac{dT_s}{dt} + \frac{T_j - T_s}{R_{Tjs}} + \frac{T_s - T_a}{R_{Tsa}} + \frac{T_s - T_b}{R_{Tsb}} = 0; \\
 C_b \frac{dT_b}{dt} + \frac{T_s - T_b}{R_{Tsb}} + \frac{T_b - T_c}{R_{Tbc}} + \frac{T_b - T_a}{R_{Tba}} = 0; \\
 C_c \frac{dT_c}{dt} + \frac{T_b - T_c}{R_{Tbc}} + \frac{T_c - T_a}{R_{Tca}} = 0; \\
 C_{j'} \frac{dT_{j'}}{dt} + \frac{T_j - T_{j'}}{R_{Tjj'}} + \frac{T_{j'} - T_a}{R_{Tj'a}} = 0,
 \end{array} \right. \quad (7)$$

где  $C_j - C_{j'}$  – соответственно теплоемкости соответствующих однородных тел: линзы, кристалла СД, контактной площадки, платы, радиатора, окружающей среды, Вт·с/°С;

$T_j - T_c$  – температуры соответствующих однородных тел, °С;

$R_{T_{jj'}} - R_{T_{ca}}$  – тепловые сопротивления соответствующих однородных тел, °С/Вт;

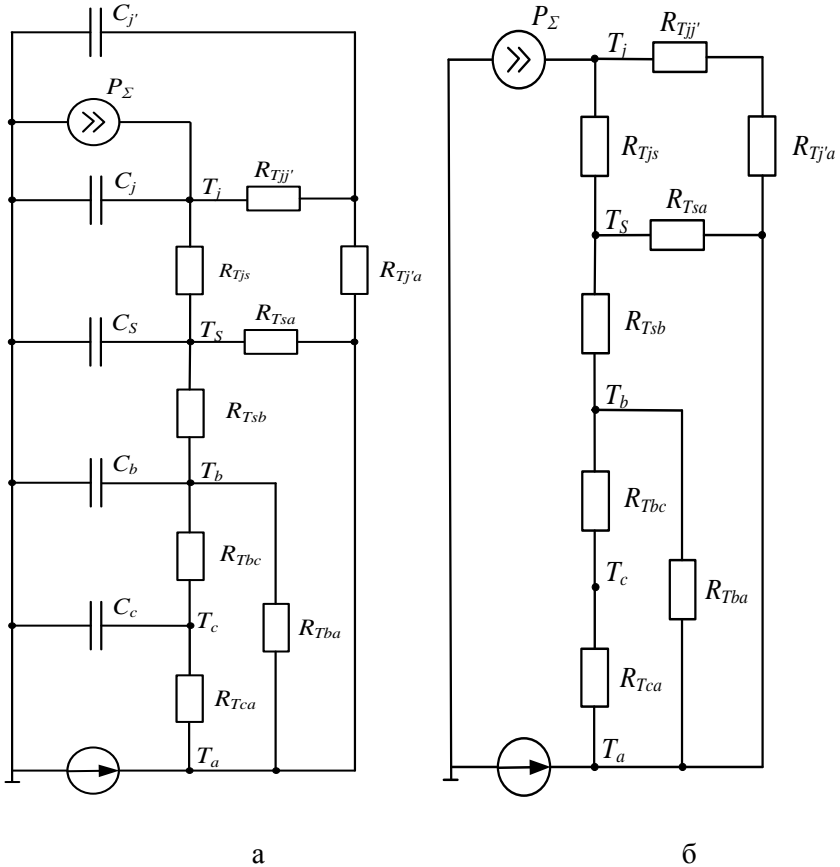
$P_{\Sigma}$  – суммарные потери активной мощности в СД, Вт. Температура внешней окружающей среды  $T_a$  определяется в результате измерений.

На основе системы дифференциальных уравнений составлены тепловые схемы замещения светодиодного устройства, переходные процессы в которых полностью идентичны нестационарным тепловым процессам (рисунок 9).

В приведенной на рисунке 9, а схеме потери мощности в первом однородном теле представлены в виде источника тока, а температура окружающей среды – в виде источника ЭДС.

Рассмотрены стационарные тепловые режимы светодиодного устройства (см. рисунок 9, б). В этом случае все производные в системе уравнений (7) будут равны нулю. После преобразований получим систему уравнений (8).

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{T_j - T_s}{R_{T_{js}}} + \frac{T_j - T_{j'}}{R_{T_{jj'}} + R_{T_{j'a}}} = P_{\Sigma}; \\ \frac{T_j - T_s}{R_{T_{js}}} + \frac{T_s - T_a}{R_{T_{sa}}} + \frac{T_s - T_b}{R_{T_{sb}}} = 0; \\ \frac{T_s - T_b}{R_{T_{sb}}} + \frac{T_b - T_c}{R_{T_{bc}}} + \frac{T_b - T_a}{R_{T_{ba}}} = 0; \\ \frac{T_b - T_c}{R_{T_{bc}}} + \frac{T_c - T_a}{R_{T_{ca}}} = 0; \\ \frac{T_j - T_{j'}}{R_{T_{jj'}}} + \frac{T_{j'} - T_a}{R_{T_{j'a}}} = 0. \end{array} \right. \quad (8)$$



а – для нестационарных тепловых режимов;  
 б – для стационарных тепловых режимов  
**Рисунок 9 – Тепловые схемы замещения светодиодной осветительной установки**

Воспользовавшись методом эквивалентных преобразований, запишем выражение для определения суммарного теплового сопротивления  $R_{\Sigma}$  (9):

$$R_{\Sigma} = \frac{AR_{Tba} + BR_{Tsb}R_{Tsa} + BDKR_{Tjs}}{AR_{Tba} + BR_{Tsb}R_{Tsa} + ADG}, \quad (9)$$

где для упрощения записи были введены следующие замены:

$$\begin{aligned} A &= R_{Tca} + R_{Tbc}; & G &= R_{Tca} + R_{Tbc} + R_{Tba} + R_{Tsb} + R_{Tsa}; \\ B &= R_{Tca} + R_{Tbc} + R_{Tba}; & D &= R_{Tca} + R_{Tbc} + R_{Tba} + R_{Tsb} + R_{Tsa}; \\ K &= R_{Tj'j} + R_{Tj'a}; \end{aligned}$$

Температура кристалла светодиодного устройства определена по выражению (10):

$$T_j = P_{\Sigma} R_{\Sigma} + T_a. \quad (10)$$

Предложены алгоритмы расчета остаточного ресурса СД осветительного устройства в реальном времени.

Для прогнозирования остаточного ресурса СД осветительной установки введен коэффициент оптического и теплового износа  $f_i$ , который находится по выражению:

$$f_i = \frac{E_{\Delta t_i}}{E_{\text{норм}}},$$

где  $E_{\text{норм}}$  – нормированное значение срока службы СД;

$E_{\Delta t_i}$  – значение срока службы светодиодной осветительной установки за период дискретизации по закону Аррениуса для  $i$ -го измерения.

Тогда время выработки СД осветительной установки за период дискретизации  $\Delta t$  равно:

$$E_{\text{выпр}i} = \frac{\Delta t_i}{f_i}.$$

Остаточный ресурс определяется по выражению:

$$E_{\text{ост}} = E_{\text{норм}} - E_{\text{выр}}.$$

Окончательное выражение для расчета остаточного ресурса СД осветительной установки имеет вид (11):

$$E_{\text{ост}} = E_{\text{норм}} - \sum_{i=1}^n E_{\text{выр}i} = E_{\text{норм}} - \frac{E_{\text{норм}}}{A} \sum_{i=1}^n \Delta t_i e^{BT_i}, \quad (11)$$

где  $n$  – количество периодов дискретизации;

$A$  и  $B$  – коэффициенты, характеризующие скорость теплового износа СД.

Предложена методика учета остаточного ресурса СД с фактическим распределением времени наработки на отказ, отличающаяся непрерывным контролем электрических и тепловых параметров СД в процессе эксплуатации, что позволяет определять остаточный ресурс с погрешностью не более 5 % и своевременно выявлять износ СД в реальных условиях эксплуатации.

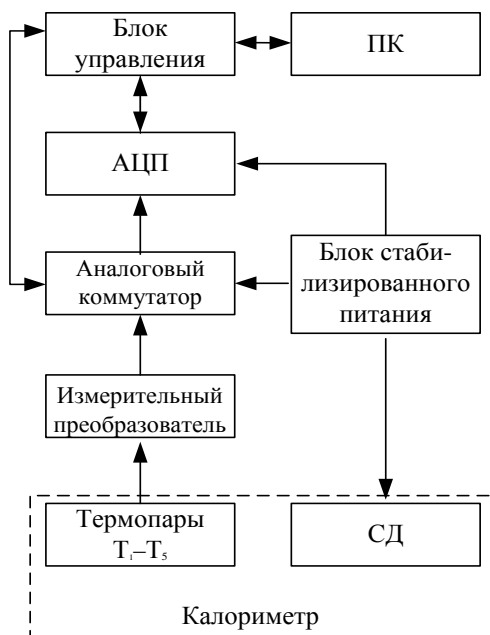
Измерения тепловых характеристик СД (СДМ) производились на разработанной установке, блок-схема установки представлена на рисунке 10. Измерение температуры проводилось термопарами, установленными в различных точках калориметра: на поверхности блока, подложке СД, на излучающей поверхности СД и на некотором расстоянии от нее. Напряжение с термопар через аналоговый коммутатор поступало на АЦП и ПК. Блок стабилизированного питания позволял поддерживать постоянную величину электрического тока, подводимого к СД.

Вычисления, выполненные на основании измерений с помощью интегрального калориметра, показали, что количество теплоты, выделяемое СДМ мощностью 50 Вт, составили около 84 %. При этом на мощность излучения в видимой области приходится около 16 % от потребляемой.

В конструкциях вариантов интегрального калориметра цилиндрический диоралевый блок помещался в теплоотводящую оболочку из слоя стекловаты или плотно прилегал к корпусу. По измеренным температу-



рам элементов калориметра определялись мощность светового излучения, мощность рассеивания и КПД, а также находилась температура активной области и тепловое сопротивление СДМ – окружающая среда. Так, тепловое сопротивление определилось суммой теплового сопротивления «активная область – печатная плата» и теплового сопротивления «печатная плата – окружающая среда», а температура кристалла СДМ – суммой температуры окружающей среды и произведения теплового сопротивления на рассеиваемую мощность.



**Рисунок 10 – Блок-схема установки для измерения тепловых характеристик СД**

Для СД типа ARPL-3W6000 с помощью сухого калориметра были рассчитаны средние температуры активной области, мощность тепловых потерь, тепловое сопротивление, мощности светового излучения и КПД СД при условии установившегося стационарного режима. Так, для токов 0,35А и 0,7А через кристалл СД: мощности тепловых потерь составили – 0,67 и 1,65 Вт; мощности светового излучения – 0,41 и 0,75 Вт;

энергетические эффективности – 38 и 31 %; температуры активной области – 85 и 149 °С; тепловые сопротивления «активная область–окружающая среда» составили соответственно 84 и 73 °С/Вт. Погрешность определения тепловых параметров СД не превысила 10 %.

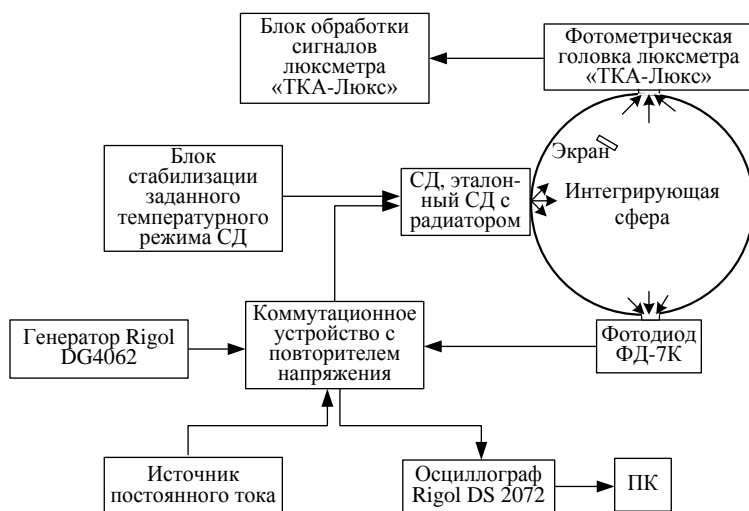
Разработанный метод определения рассеиваемой мощности СД и СДМ с помощью интегрального и сухого калориметров может применяться при проектировании светодиодных осветительных устройств, позволяет удешевить измерения более чем в 2,3 раза с погрешностью измерений 0,61 и 6,14 % (при использовании приборов для измерения температуры с разрешением 0,05 °С и с разрешением 0,1 °С), которая находится в допустимых пределах измерений.

**В четвертой главе** разработана методика определения энергетических и оптических характеристик холодно-белых СД и СДМ. Измерения энергетических и оптических характеристик проводились методом «Интегрирующей сферы» на испытательном фотометрическом стенде, структурная схема которого приведена на рисунке 11, с использованием фотометрического шара, покрытого изнутри слоем сульфата бария  $\text{BaSO}_4$ , рассеивающего свет в соответствии с законом Ламберта. Сравнение мощности излучения мощного СД или СДМ с мощностью излучения эталонного СД, осуществлялось калиброванным люксметром «ТКА-Люкс» в диапазоне 0–200 кЛк. В качестве эталонных источников холодно-белого света использовались СД и СДМ, калиброванных на спектрометрическом комплексе с интегрирующей сферой DTF–320-201. Определение энергетических параметров осуществлялось при фиксированных температурах подложки СД в интервале от +20 до +90 °С.

По результатам измерений при питании постоянным током был определен КПД для ряда СД и СДМ в широком диапазоне потребляемых мощностей и температур. Увеличение КПД СД в диапазоне малых потребляемых мощностей до 0,025 Вт не зависит от температуры печатной платы. С ростом потребляемой мощности (более 0,025 Вт) увеличивается температура печатной платы, падает эффективность СД; мощность излучения уменьшается, а мощность теплового излучения увеличивается тем сильнее, чем хуже теплоотвод.

Разработана и реализована методика определения энергетических и оптических характеристик макета светотехнического устройства

при импульсном возбуждении, которая позволяет с достаточной точностью определять действующее значение потребляемой мощности СД, СДМ и МСУ за время действия импульса, мощность излучения и КПД при работе на импульсном токе инжекции. Предлагаемая методика позволяет определять энергетические и оптические характеристики СД в широком диапазоне частот следования импульсов, скважности для различной формы и при различных температурах подложки СД.



**Рисунок 11 – Структурная схема испытательного фотометрического стенда**

Показано, что форма питающего импульса влияет на КПД. Так, при работе на токе инжекции с импульсами треугольной и трапециевидной форм эффективность ниже, чем при прямоугольной форме импульсного тока инжекции. Форма светового импульса определяется формой возбуждающего импульса, постоянной регистрирующей системы и зависит от температуры.

Исследование зависимости мощности излучения СД от частоты возбуждающего импульса длительностью 50 мкс в диапазоне частот от 100 до 12000 Гц показало, что оптическая мощность излучения

практически не зависит от частоты следования возбуждающего импульса в этом диапазоне.

Результаты исследований энергетических и светотехнических характеристик при работе на постоянном и импульсном токе инжекции в широком диапазоне потребляемых мощностей были использованы для сопровождения серийного производства светодиодных светильников ЧУП «Светотехника» ООО «БелГИЗ».

В пятой главе разработаны методические рекомендации по совершенствованию высокоэффективных светодиодных устройств с удаленными преобразователями.

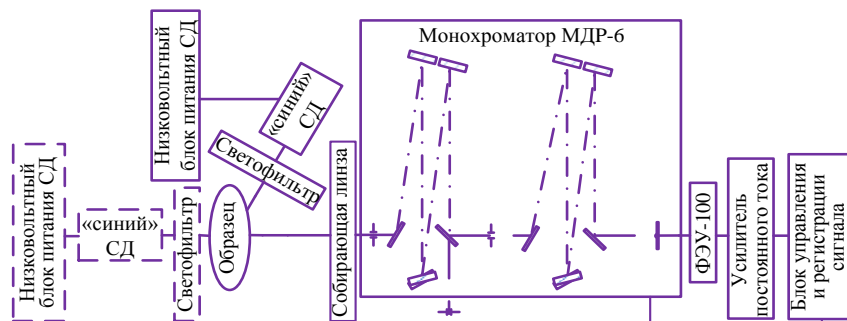
Исследовались стеклокерамические оптические композиты на основе ультрадисперсных порошков иттрий-алюминиевого граната, активированного ионами церия.

Наноструктурированные порошки иттрий-алюминиевого граната, легированного церием, были синтезированы методом горения азотнокислых солей в сахарозе. В качестве основы для люминофорной композиции использовано легкоплавкое стекло состава  $\text{BaO}-\text{Bi}_2\text{O}_3-\text{B}_2\text{O}_3-\text{K}_2\text{O}-\text{SiO}_2$  с температурой размягчения не более  $600^\circ\text{C}$ . В ряде экспериментов в состав композиции в качестве диффузно-рассеивающего компонента вводился порошок кварцевого стекла, улучшающего светотехнические характеристики. Для подложки использовались как гладкие, так и рифленые стекла.

Для установления степени влияния размеров частиц и процентного содержания диффузно-рассеивающего компонента на квантовый выход и спектральный состав излучения на базе монохроматора МДР-6 была создана экспериментальная установка (рисунок 12).

Возбуждение люминесценции иттрий-алюминиевого граната производилось в области полосы поглощения иона  $\text{Ce}^{3+}$ , находящейся в синей области, СД LED-003W-07C-020-030LM-EL-P с длиной волны излучения в диапазоне 440–460 нм, что соответствовало переходам из  $4f^5F_{5/2}$  на расщепленные уровни  $5d$  состояния. Возбуждающее люминесценцию излучение СД через светофильтр ФС-6 попадало на образец. Положение СД, фильтра и линзы при измерении люминесценции на пропускание показано на рисунке 12 пунктиром. Излучение образца через собирающую линзу попадало на входную щель монохроматора МДР-6. В монохроматоре были установлены две дифракционные решетки с 1200 штрихами на миллиметр. За выходной

шелью монохроматора помещался фотоумножитель ФЭУ-100. Далее фототок умножителя усиливался и попадал в блок управления и регистрации. Управление установкой, предварительная обработка результатов измерений и передача их в ПК осуществлялась микроконтроллером «Arduino». Спектры люминесценции пересчитывались по спектру эталонного холодно-белого СД LED-003W-15С.



**Рисунок 12 – Блок-схема экспериментальной установки для исследования фотолюминесценции**

Измеренные спектры излучения люминофора имели широкую полосу в области 500–700 нм, что соответствовало переходам иона  $\text{Ce}^{3+}$  из состояния 5d на уровни 4f – оболочки с максимумом примерно при длине волны 550 нм.

Установлено, что наибольшей интенсивностью люминесценции при возбуждении на длине волны  $\lambda = 440\text{--}460$  нм обладают люминофорные покрытия, полученные с использованием наноструктурированного порошка иттрий-алюминиевого граната, легированного ионами церия, с добавлением в качестве диффузно-рассеивающего компонента порошка кварцевого стекла в количестве 16,7 % и со средним размером частиц 400 мкм.

На основании анализа и оценки спектров люминесценции установлено, что эффективность переизлучения люминофорных покрытий зависит от размера частиц диффузно-рассеивающей компоненты: с увеличением размеров частиц от 0,15 до 0,4 мкм и при уменьшении массы кварца в составе покрытия от 0,6 до 0,2 г квантовый выход люминесценции возрастает на 10–15 %.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

### **Основные научные результаты диссертации**

Среди наиболее существенных научно-технических результатов, полученных в ходе проведения исследований, необходимо отметить следующие.

1. Теоретически обоснован и экспериментально подтвержден уточненный критерий стоимости световой энергии для установления эффективного режима работы холодно-белых СД осветительных устройств. Разработанный критерий позволяет снизить стоимость световой энергии, среднюю температуру кристалла СД, повысить КПД СД в осветительных устройствах не менее чем на 10 %. Определение эффективного режима работы СД осветительных устройств предполагает проектирование осветительных установок для применения на предприятиях с непрерывным режимом работы [4, 14, 20, 23, 32, 35].

Разработана методика определения энергетических и оптических характеристик СД при работе на постоянном и импульсном токе инжекции, отличающаяся возможностью оценивать эффективность СД при различных видах и параметрах тока инжекции и стабильном тепловом режиме их работы, позволяющая определять рассеиваемую и излучаемую мощности излучения для определения оптимального режима работы светодиодных осветительных устройств при их проектировании [2, 5, 18, 19, 21, 24].

2. Предложен новый метод и разработаны конструкции интегрального и сухого калориметров для определения рассеиваемой мощности холодно-белых СД. Предложенный метод и разработанные калориметры позволяют определять среднюю температуру кристалла, тепловое сопротивление, энергию светового излучения, КПД и удешевить измерения более чем в 2,3 раза по сравнению с существующими аналогами. Полученные методом измерительного и вычислительного экспериментов данные могут применяться для контроля качества СД, а также при проектировании светодиодных осветительных установок для определения эффективного режима их работы при сохранении погрешности в допустимых пределах [1, 3, 7, 9, 16, 17, 27, 29, 30, 34, 36–38].

3. Предложена новая методика учета остаточного ресурса светодиодных осветительных устройств с непрерывным контролем электрических и тепловых параметров СД в процессе эксплуатации и использованием зависимости срока службы СД от этих параметров. Полученные данные на основе созданных алгоритмов позволяют рассчитывать потребляемую мощность светильника, контролировать физический износ СД по сравнению значений их температуры и потребляемой мощности, фиксировать время нахождения во включенном состоянии и количество коммутаций, предотвращать ущерб от несвоевременного выхода из строя светодиодных осветительных устройств и определять остаточный ресурс с погрешностью не более 5 % [10, 31, 32].

4. Разработаны методические рекомендации по совершенствованию высокоэффективных светодиодных устройств с удаленными преобразователями с использованием впервые установленной закономерности влияния на квантовый выход люминесценции новосинтезированных люминофорных покрытий, полученных с применением наноструктурированного порошка иттрий-алюминиевого граната, легированного церием. Экспериментально подтверждено, что квантовый выход люминесценции возрастает на 10–15 % с увеличением размеров частиц и уменьшением количества рассеивающих частиц кварца в составе покрытия. Это позволяет создавать стеклокерамические образцы люминесцентных покрытий для использования в качестве эффективных светопреобразователей, перспективных для создания новых источников белого света, и светотехнических устройств с улучшенными характеристиками [6, 8, 22, 25, 26, 28].

Новизна предлагаемого способа измерения энергии тепловых потерь при испытании полупроводниковых СД, разработанного по предложенным в диссертации принципам, подтверждается патентом на служебное изобретение Республики Беларусь.

Новизна светового прибора повышенной эффективности на основе СД и калориметров, разработанных по предложенным в диссертации принципам, подтверждается четырьмя патентами на полезную модель Республики Беларусь.



## СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ СОИСКАТЕЛЯ УЧЕНОЙ СТЕПЕНИ

### Статьи в изданиях, включенных в перечень научных изданий Республики Беларусь для опубликования результатов диссертационных исследований

1. Савкова, Т. Н. Измерение энергии тепловых потерь мощного светодиодного модуля / Т. Н. Савкова, А. И. Кравченко // Вестн. Гомел. гос. техн. ун-та им. П. О. Сухого. – 2013. – № 3. – С. 88–92.

2. Исследование энергетических и оптических характеристик мощных светодиодов при импульсном возбуждении // Т. Н. Савкова, А. И. Кравченко, Е. Н. Подденежный, Н. Колесник, С. Н. Кухаренко, В. М. Лукашов / Вестн. Гомел. гос. техн. ун-та им. П. О. Сухого. – 2015. – № 3. – С. 78–85.

3. Определение средней рассеиваемой мощности светодиодным модулем / Т. Н. Савкова, А. И. Кравченко, Е. Н. Подденежный, Ю. Н. Колесник, А. А. Бойко // Вестн. Тамб. гос. техн. ун-та. – 2015. – Т. 21, № 2. – С. 273–278.

4. Оптимизация режимов работы макета светотехнического устройства на основе светодиодов / Т. Н. Савкова, А. И. Кравченко, Е. Н. Подденежный, И. П. Кравченко // Фундамент. и приклад. проблемы техники и технологии. – 2015. — № 5. – С. 266–272.

5. Определение энергетических и оптических характеристик макета светотехнического устройства при импульсном возбуждении в программной среде MATHCAD / Т. Н. Савкова, А. И. Кравченко, С. Н. Кухаренко, В. М. Лукашов, А. В. Свинтицкий // Вестн. Оренбург. гос. ун-та. – 2015. – № 9. – С. 150–156.

6. Получение и свойства люминофорных покрытий на основе наноструктурированного иттрий-алюминиевого граната и легкоплавкого стекла / О. В. Урецкая, Н. Е. Дробышевская, Е. Н. Подденежный, А. И. Кравченко, Т. Н. Савкова // Тонкие хим. технологии. – 2015. – Т. 10, № 3. – С. 85–90.

7. Савкова, Т. Н. Калориметрический способ определения тепловых характеристик мощных светодиодов / Т. Н. Савкова, А. И. Кравченко, Ю. Н. Колесник // Естеств. и техн. науки. – 2016. – № 11. – С. 152–155.

8. Получение и спектрально-люминесцентные характеристики композиционных материалов на основе YAG:Ce для светодиодных



преобразователей // О. В. Давыдова, А. В. Павленок, А. О. Добродей, Е. Н. Подденежный, Н. Е. Дробышевская, А. А. Бойко, А. И. Кравченко, Т. Н. Савкова / Вестн. Гомел. гос. техн. ун-та им. П. О. Сухого. – 2016. – № 3. – С. 24–31.

9. Colorimetric method of determining the temperature of the active region of high-power leds / Т. Savkova, А. Kravchenko, S. Kukhareno, Y. Kalesnik // Danish scientific journal. – 2018. – Vol. 2, № 18. – P. 32–36.

10. Савкова, Т. Н. Автоматизация расчета остаточного ресурса светодиодных осветительных установок / Т. Н. Савкова / Вестн. Белорус.-рос. ун-та. – 2020. – № 4. – С. 32–36.

11. Современное состояние и перспективы развития осветительных устройств на основе белых светодиодов / Т. Н. Савкова, А. И. Кравченко, Ю. Н. Колесник, Г. И. Селиверстов / Вестн. Гомел. гос. техн. ун-та им. П. О. Сухого. – 2020. – № 4. – С. 32–36.

#### **Материалы конференций и тезисы докладов**

12. Савкова, Т. Н. Анализ светотехнических характеристик современных источников света / Т. Н. Савкова, Т. В. Алфёрова // Исследования и разработки в области машиностроения, энергетики и управления : материалы XI Междунар. науч.-техн. конф., Гомель, 28–29 апр. 2011 г. / М-во образования Респ. Беларусь, Гомел. гос. техн. ун-та им. П. О. Сухого ; редкол. А. А. Бойко [и др.]. – Гомель, 2011. – С. 507–511.

13. Савкова, Т. Н. Тепловые генераторы – как средство снижения энергопотребления источников света / Т. Н. Савкова, В. Н. Дубровский, А. И. Кравченко // Актуальные вопросы физики и техники : материалы респ. науч.-практ. конф., Гомель, 14 марта 2013 г. / М-во по чрезвычайн. ситуациям Респ. Беларусь, Гомел. инженер. ин-т ; редкол. П. В. Астахов (науч. ред.) [и др.]. – Гомель, 2013. – С. 44–48.

14. Савкова, Т. Н. Методы оптимизации тепловых режимов в конструкциях световых приборов / Т. Н. Савкова, В. Н. Красаков, А. И. Кравченко // Актуальные вопросы физики и техники : материалы респ. науч.-практ. конф., Гомель, 14 марта 2013 г. / М-во по чрезвычайн. ситуациям Респ. Беларусь, Гомел. инженер. ин-т ; редкол. П. В. Астахов (науч. ред.) [и др.]. – Гомель, 2013. – С. 51–53.

15. Савкова, Т. Н. Устройство управления спектральным составом и световыми характеристиками источника света / Т. Н. Савкова, А. И. Кравченко, И. И. Климашевский // Актуальные вопросы физики и техники : материалы респ. науч.-практ. конф., Гомель, 14 марта

2013 г. / М-во по чрезвычайн. ситуациям Респ. Беларусь, Гомел. инженер. ин-т ; редкол. П. В. Астахов (науч. ред.) [и др.]. – Гомель, 2013. – С. 48–51.

16. Савкова, Т. Н. Метод измерения тепловой энергии, выделяемой мощным светодиодом / Т. Н. Савкова, А. И. Кравченко // Актуальные вопросы физики и техники : материалы респ. науч.-практ. конф., Гомель, 14 марта 2013 г. / М-во по чрезвычайн. ситуациям Респ. Беларусь, Гомел. инженер. ин-т ; редкол. П. В. Астахов (науч. ред.) [и др.]. – Гомель, 2013. – С. 57–61.

17. Савкова, Т. Н. Определение количества теплоты, выделяемой светодиодным модулем / Т. Н. Савкова, А. И. Кравченко // Чрезвычайные ситуации: теория и практика : материалы Междунар. науч.-практ. конф., Гомель, 16 мая 2013 г. / М-во по чрезвычайн. ситуациям Респ. Беларусь, Гомел. инженер. ин-т ; редкол. : И. И. Суторьма (науч. ред.) [и др.]. – Гомель, 2013. – С. 462–465.

18. Савкова, Т. Н. Энергетические параметры макета светотехнического устройства, изготовленного на основе мощных светодиодов / Т. Н. Савкова, А. И. Кравченко // Естественные науки – базис подготовки специалиста для органов и подразделений по ЧС : материалы II Респ. науч.-практ. конф., Гомель, 21 марта 2014 г. / М-во по чрезвычайн. ситуациям Респ. Беларусь, Гомел. инженер. ин-т ; редкол. П. В. Астахов (науч. ред.) [и др.]. – Гомель, 2014. – С. 48–52.

19. Савкова, Т. Н. Определение КПД мощных светодиодов / Т. Н. Савкова, А. И. Кравченко // Актуальные вопросы физики и техники : материалы III Респ. науч.-конф., Гомель, 17 апр. 2014 г. / М-во образования Респ. Беларусь, Гомел. гос. ун-т им. Ф. Скорины ; редкол. А. В. Рогачев [и др.]. – Гомель, 2014. – С. 53–55.

20. Савкова, Т. Н. Оптимизация режима работы макета светотехнического устройства, на основе мощных светодиодов / Т. Н. Савкова, А. И. Кравченко, Ю. Н. Колесник // Исследования и разработки в области машиностроения, энергетики и управления : материалы XIV Междунар. науч.-техн. конф., Гомель, 24–25 апр. 2014 г. / М-во образования Респ. Беларусь, Гомел. гос. техн. ун-т им. П. О. Сухого ; под общ. ред. А. А. Бойко [и др.]. – Гомель, 2014. – С. 488–491.

21. Савкова, Т. Н. Энергоэффективность мощных светодиодов / Т. Н. Савкова, Ю. В. Прядко, А. И. Кравченко // Чрезвычайные ситуации: теория, практика и инновации» : материалы Междунар. науч.-

практ. конф., Гомель, 22–23 мая 2014 г. / М-во по чрезвычайн. ситуациям Респ. Беларусь, Гомел. инженер. ин-т ; редкол. И. И. Суторьма (науч. ред.) [и др.]. – Гомель, 2014. – С. 265.

22. Получение и люминесцентные свойства люминофорных покрытий на основе легкоплавкого стекла / О. В. Урецкая, Н. Е. Дробышевская, Е. Н. Подденежный, А. А. Бойко, Т. Н. Савкова, А. И. Кравченко // Современные проблемы машиноведения : тез. докл. X Междунар. науч.-техн. конф. (науч. чтения, посвящ. П. О. Сухому), Гомель, 23–24 окт. 2014 г. / Мин-во образования Респ. Беларусь, Гомел. гос. техн. ун-т. ; под общ. ред. С. И. Тимошина. – Гомель, 2014. – С. 52–53.

23. Савкова, Т. Н. Оптимальные энергетические параметры макета светотехнического устройства, на основе светодиодов / Т. Н. Савкова, А. И. Кравченко // Прикладные и фундаментальные исследования : материалы VII Междунар. науч. конф., Сент-Луис, Миссури, США, 29–30 нояб. 2014 г. / редкол.: Я. Максимов [и др.]. – Сент-Луис, Миссури, США, 2015. – С. 238–242.

24. Савкова, Т. Н. Энергетические характеристики холодно-белых светодиодов в импульсном режиме / Т. Н. Савкова, А. И. Кравченко // Естественные науки – базис подготовки специалиста для органов и подразделений по ЧС : материалы III Респ. науч.-практ. конф., Гомель, 1 апр. 2015 г. / ГИИ МЧС РБ, Гомел. фил. Нац. акад. наук Беларуси ; редкол. П. В. Астахов [и др.]. – Гомель, 2015. – С. 44–49.

25. Савкова, Т. Н. Экспериментальная спектроскопическая установка на базе монохроматора МДР-6 / Т. Н. Савкова, А. М. Яцино, А. И. Кравченко // Естественные науки – базис подготовки специалиста для органов и подразделений по ЧС : материалы III Респ. науч.-практ. конф., Гомель, 1 апр. 2015 г. / ГИИ МЧС РБ, Гомел. фил. Нац. акад. наук Беларуси ; редкол. П. В. Астахов [и др.]. – Гомель, 2015. – С. 50–56.

26. Шур, П. Г. Люминесцентные свойства люминофорных покрытий на основе наноструктурированного иттрий-алюминиевого граната и легкоплавкого стекла / П. Г. Шур, Т. Н. Савкова // Естественные науки – базис подготовки специалиста для органов и подразделений по ЧС : материалы IV Респ. науч.-практ. конф., Гомель, 1 апр. 2016 г. / М-во по чрезвычайн. ситуациям Респ. Беларусь, Гомел. инженер. ин-т, каф. «Естеств. науки». – Гомель, 2016. – С. 48–53.

27. Савкова, Т. Н. Калориметрический способ определения тепловых характеристик мощных светодиодов / Т. Н. Савкова, А. И. Кравченко // Чрезвычайные ситуации: теория и практика» : материалы Междунар. науч.-практ. конф., Гомель, 19–20 мая 2016 г. / М-во по чрезвычайн. ситуациям Респ. Беларусь, Гомел. инженер. ин-т ; редкол. А. Э. Набатова (науч. ред.) [и др.]. – Гомель, 2016. – С. 123–124.

28. Полимерно-кристаллические оптические композиты / О. В. Давыдова, Н. Е. Дробышевская, Е. Н. Подденежный, Т. Н. Савкова, В. М. Шаповалов // Современные проблемы машиноведения : тез. докл. XI Междунар. науч.-техн. конф. (науч. чтения, посвящ. П. О. Сухому), Гомель, 20–21 окт. 2016 г. / Мин-во образования Респ. Беларусь, Гомел. гос. техн. ун-т ; под общ. ред. С. И. Тимошина. – Гомель, 2016. – С. 109–110.

29. Савкова, Т. Н. Определение тепловых характеристик мощных светодиодов / Т. Н. Савкова, А. И. Кравченко, Ю. Н. Колесник // Приборостроение – 2016 : материалы 9-й Междунар. науч.-техн. конф., Минск, 23–25 нояб. 2016 г. / БНТУ ; редкол.: О. К. Гусев [и др.]. – Минск, 2016. – С. 118–120.

30. Определение тепловых параметров мощных светодиодов с помощью калориметра / Т. Н. Савкова, А. И. Кравченко, С. Н. Кухаренко, Ю. Н. Колесник, И. М. Абдельхай // Прикладные и фундаментальные исследования : материалы XIII Междунар. науч. конф., Сент-Луис, Миссури, США, 9–10 дек. 2017 г. / редкол. Я. Максимов [и др.]. – Сент-Луис, Миссури, США, 2017. – № 2. – С. 32–36.

31. Автоматическая система контроля остаточного ресурса светодиодного светильника / Т. Н. Савкова, Д. И. Зализный, Г. И. Селиверстов, А. И. Кравченко // Современные проблемы машиноведения : материалы XIII Междунар. науч.-техн. конф. (науч. чтения, посвящ. 125-летию со дня рождения П. О. Сухого), Гомель, 22 окт. 2020 г. / М-во образования Респ. Беларусь, Гомел. гос. техн. ун-т им. П. О. Сухого, Филиал ПАО «Компания «Сухой» ОКБ «Сухого» ; под общ. ред. А. А. Бойко. – Гомель, 2020. – С. 198–200.

32. Выбор и обоснования критерия оценки эффективности при проектировании светодиодного осветительного устройства / Т. Н. Савкова, А. И. Кравченко, Г. И. Селиверстов, Ю. Н. Колесник, С. Н. Кухаренко // Прикладные и фундаментальные исследования : материалы XXII Междунар. науч. конф., Сент-Луис, Миссури, США,

26 декабря, 2020 г. / редкол. Я. Максимов [и др.]. – Сент-Луис, Миссури, США, 2020. – № 2. – С. 19–28.

33. Савкова, Т. А. Прогнозирование остаточного ресурса светодиодного осветительного устройства / Т. Н. Савкова, Г. И. Селиверстов Ю. Н. Колесник // Перспективы инновационного развития угольных регионов России : сб. тр. VII Междунар. науч.-практ. конф., Прокопьевск, 13–14 апр. 2022 г. / редкол. Е. Г. Кузин [и др.]. – Прокопьевск, 2022. – С. 166–169.

### **Патенты**

34. Калориметр : пат. на полезную модель 10562 Респ. Беларусь, МПК G01K 17/06, H 01L21/67 / Т. Н. Савкова, А. И. Кравченко ; заявитель ГГТУ им. П. О. Сухого. – № u 20140268 ; заявл. 21.07.14 ; опубл. 17.11.14 // Афіцыйны бюл. / Нац. цэнтр інтэлектуал. уласнасці. – 2015. – № 1. – С. 160.

35. Световой прибор повышенной эффективности на основе СД : пат. на полезную модель 10588 Респ. Беларусь, МПК F21S 8/00, F 21L 14/02 / Т. Н. Савкова, А. И. Кравченко ; заявитель ГГТУ им. П. О. Сухого. – № u 20140341 ; заявл. 22.09.14 ; опубл. 28.11.14 // Афіцыйны бюл. / Нац. цэнтр інтэлектуал. уласнасці. – 2015. – № 1. – С. 157.

36. Калориметр : пат. на полезную модель 10984 Респ. Беларусь, МПК G01K 17/06, H 01L21/67 / Т. Н. Савкова, А. И. Кравченко ; заявитель ГГТУ им. П. О. Сухого. – № u 20150360 ; заявл. 26.10.15 ; опубл. 15.12.15 // Афіцыйны бюл. / Нац. цэнтр інтэлектуал. уласнасці. – 2016. – № 2. – С. 157.

37. Способ измерения энергии тепловых потерь при испытании мощного полупроводникового светодиода : пат. 20248 на служебное изобретение Респ. Беларусь, МПК 13 H01L 21/66 / Т. Н. Савкова, А. И. Кравченко ; заявитель ГГТУ им. П. О. Сухого. – № a 20131127 ; заявл. 30.09.13 ; опубл. 13.04.16 // Афіцыйны бюл. / Нац. цэнтр інтэлектуал. уласнасці. – 2016. – № 4. – С. 164.

38. Калориметр : пат. на полезную модель 11354 Респ. Беларусь, МПК G01K 17/06, H 01L21/67 / Т. Н. Савкова, А. И. Кравченко, Ю. Н. Колесник ; заявитель ГГТУ им. П. О. Сухого. – № u 20160288 ; заявл. 16.09.16 ; опубл. 30.04.17 // Афіцыйны бюл. / Нац. цэнтр інтэлектуал. уласнасці. – 2017. – № 2. – С. 150.

## РЕЗЮМЕ

Савкова Татьяна Николаевна

### **Комплексная оценка энергетической и светотехнической характеристик холодно-белых светодиодов в осветительных устройствах**

**Ключевые слова:** рассеиваемая мощность, КПД, температура кристалла, тепловое сопротивление, калориметрический способ, холодно-белые СД, светодиодные осветительные устройства.

**Цель работы:** в развитии научно-методических основ повышения энергетической эффективности холодно-белых СД.

**Методы исследования:** в ходе работы проводились экспериментальные исследования. Применялись методы теоретического анализа, вычислительного и натурального экспериментов, аппроксимации экспериментальных данных и математического моделирования.

**Полученные результаты и их новизна.** Предложен уточненный критерий стоимости световой энергии для установления эффективного режима работы холодно-белых СД на этапе проектирования осветительного устройства для применения в 2-, 3-сменном режиме работы предприятий. Разработан метод определения тепловых характеристик холодно-белых СД, энергии светового излучения и коэффициента полезного действия с помощью интегрального и сухого калориметров. Предложена методика учета остаточного ресурса СД осветительных устройств с непрерывным контролем электрических и тепловых параметров СД в процессе эксплуатации. Предложены методические рекомендации по совершенствованию высокоэффективных светодиодных устройств с удаленными преобразователями с использованием впервые установленной закономерности влияния на квантовый выход люминесценции новосинтезированных люминофорных покрытий.

**Рекомендации по практическому использованию результатов, область применения:** предложенные научно-технические решения могут быть использованы на предприятиях, занимающихся разработкой и производством светодиодных осветительных устройств.

## РЭЗІЮМЭ

Саўкова Таццяна Мікалаеўна

### Комплексная ацэнка энергетычнай і святлотэхнічнай характарыстык халодна-белых святлодыёдаў у асвятляльных прыладах

**Ключавыя словы:** расейваная магутнасць, каэфіцыент карыснага дзеяння, тэмпература крыстала, цеплавы супраціў, каларыметрычаскі метад, халодна-белыя СД, святлодыёдныя асвятляльныя прылады.

**Мэта працы:** у развіцці навукова-метадычных асноў павышэння энергетычнай эфектыўнасці халодна-белых СД.

**Метады даследавання:** у ходзе работы праводзіліся эксперыментальныя даследаванні. Ужываліся метады тэарэтычнага аналізу, вылічальнага і натуральнага эксперыментаў, апраксімацыі эксперыментальных дадзеных і матэматычнага мадэлявання.

**Атрыманыя вынікі і іх навізна.** Прапанаваны ўдакладнены крытэрыі кошту светлавой энергіі для ўстанаўлення эфектыўнага рэжыму работы халодна-белых СД на этапе праектавання асвятляльнага ўстройства для прымянення ў 2-, 3-зменным рэжыме работы арганізацый і прадпрыемстваў. Распрацаваны спосаб вызначэння цеплавых характарыстык халодна-белых СД, энергіі светлавога выпраменьвання і каэфіцыента карыснага дзеяння з дапамогай інтэгральнага і сухога каларыметраў. Прапанавана метадыка ўліку рэшткавага рэсурсу СД у асвятляльных прылад з няспынным кантролем электрычных і цеплавых параметраў святлодыёдаў у працэсе эксплуатацыі. Прапанаваны метадычныя рэкамендацыі па удасканаленні высокаэфектыўных святлодыёдных прылад з выдаленымі пераўтваральнікамі з выкарыстаннем ўпершыню усталяванай заканамернасці ўплыву на квантавы выхад люмінесцэнцыі новасінтэзаваных люмінафорных пакрыццяў.

**Рэкамендацыі па практычным выкарыстанні вынікаў, вобласць прымянення:** прапанаваныя навукова-тэхнічныя рашэнні могуць быць выкарыстаны на прадпрыемствах, якія займаюцца распрацоўкай і вытворчасцю святлодыёдных асвятляльных прылад.

## SUMMARY

Saukova Tatsiana Nikolaevna

### **Comprehensive assessment of energy and lighting characteristics of cold-white LEDs in lighting devices**

**Key words:** power dissipation, efficiency, temperature of the crystal, thermal resistance, calorimetric method, cold-white LEDs, LED lighting devices.

**Purpose of work:** in the development of scientific and methodological foundations for increasing the energy efficiency of cold-white LEDs.

**Research methods:** experimental research was carried. Methods of theoretical analysis, computational and natural experiments, approximation of experimental data and mathematical modeling were used.

**The results obtained and their novelty.** A refined criterion for cost of light energy is proposed to establish an effective operating mode for cold-white LEDs at the stage of designing a lighting device for use in 2-, 3-shift operation of enterprises. A method has been developed for determining the thermal characteristics of cold-white LEDs, the energy of light radiation and the efficiency using integral and dry calorimeters. A method is proposed for accounting of the residual life of LED lighting devices with continuous monitoring of the electrical and thermal parameters of LEDs during operation. Guidelines for the improving of highly efficient LED devices with remote converters are proposed using the first established regularity of the effect on the quantum yield of luminescence of newly synthesized phosphor coatings obtained.

**Recommendations for the practical use of the results, field of application:** the proposed scientific and technical solutions can be used at enterprises engaged in the development and production of LED lighting devices to improve their technical perfection.



Научное издание

**САВКОВА**  
**Татьяна Николаевна**

**КОМПЛЕКСНАЯ ОЦЕНКА  
ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ И СВЕТОТЕХНИЧЕСКОЙ  
ХАРАКТЕРИСТИК ХОЛОДНО-БЕЛЫХ  
СВЕТОДИОДОВ В ОСВЕТИТЕЛЬНЫХ УСТРОЙСТВАХ**

Автореферат диссертации  
на соискание ученой степени кандидата технических наук  
по специальности 05.11.01 – приборы и методы измерения

Подписано в печать 17.05.23 Формат 60×84/16. Бумага офсетная.  
Цифровая печать. Усл. печ. л. 2,27. Уч.-изд. 1,84. Тираж 60. Заказ 429.

Издатель и полиграфическое исполнение:  
Белорусский национальный технический университет.  
Свидетельство о государственной регистрации издателя, изготовителя,  
распространителя печатных изданий № 1/173 от 12.02.2014. 220013,  
г. Минск, Пр. Независимости, 65

Лист изменений в автореферат  
«КОМПЛЕКСНАЯ ОЦЕНКА ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ И СВЕТОТЕХНИЧЕСКОЙ  
ХАРАКТЕРИСТИК ХОЛОДНО-БЕЛЫХ СВЕТОДИОДОВ В  
ОСВЕТИТЕЛЬНЫХ УСТРОЙСТВАХ»  
Савковой Татьяны Николаевны

**ЗАКЛЮЧЕНИЕ**

Следует дополнить подразделом

**Рекомендации по практическому использованию результатов**

Результаты, алгоритмические и технические решения, полученные при проведении исследований, использованы при выполнении работы по теме «Разработка макетов, моделирование светодиодных осветительных приборов на основе удаленных преобразователей и изучение их характеристик» ГПНИ «Химические технологии и материалы, природно-ресурсный потенциал», подпрограмма «Химические технологии, реагенты и материалы», 2014–2015 гг. шифр ГР 20141924 от 20.08.2014.

Полученные результаты также могут быть использованы в научно-исследовательских, проектных, опытно-конструкторских и других организациях, которые осуществляют проектирование, модернизацию, разработку и исследования устройств с мощными холодно-белыми СД, светодиодными модулями и люминофорными покрытиями, используемыми для производства осветительных приборов. Результаты диссертационной работы внедрены в проектные работы и промышленное производство лаборатории ЧУП «Светотехника» ОО «БелТИЗ», а также в учебный процесс ГГТУ имени П.О. Сухого.

Соискатель



Савкова Т.Н.

Ученый секретарь совета по защите  
диссертаций Д 02.05.17



Ризноокая Н.Н.