

# СВЕТО 5·2020 ТЕХНИКА



Наши преимущества:

- Широкий ассортимент
- Сертифицированная продукция
- Изготовление кронштейнов по индивидуальному техническому заданию или эскизу

**Качество**  
**Надежность**  
**Оперативность**



Россия, г. Москва,  
проспект Мира, 106



[opora-e.com](http://opora-e.com)



(495) 785-37-40

ООО «Лихославльский завод  
светотехнических изделий»

## Ультрафиолетовые облучатели ЛЗСИ – надёжная защита от бактерий и вирусов!



**БАКТЕРИЦИДНЫЕ ОБЛУЧАТЕЛИ  
ОТКРЫТОГО ТИПА – ЭТО:**

- ВЫСОКАЯ СКОРОСТЬ ДЕЗИНФЕКЦИИ
- МАКСИМАЛЬНАЯ РЕЗУЛЬТАТИВНОСТЬ
- ЭКОНОМИЧНОСТЬ ЭКСПЛУАТАЦИИ
- ПРОСТОТА ПРИМЕНЕНИЯ



171210, Тверская область,  
г. Лихославль, Первомайская  
улица, 51



galad.ru



(48261) 3-59-04

Бактерицидный облучатель открытого типа «Нуклон»

**НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ**

Основан в 1932 году профессорами М.А. Шателеном и Л.Д. Белькиндом и восстановлен после ВОВ профессором В.В. Мешковым

**УЧРЕДИТЕЛИ:**

- Академия электротехнических наук РФ
- Всесоюзный научно-исследовательский светотехнический институт (ВНИСИ)
- Национальный исследовательский университет «МЭИ»

**РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ**

**Г.В. Боос**, председатель редакционной коллегии, к.т.н., НИУ «МЭИ», Москва  
**С.Г. Ашурков**, к.т.н., Москва  
**М.Л. Белов**, д.т.н., проф., НИУ «МГТУ им. Н.Э. Баумана», Москва  
**Т. Берген** (*Tony Bergen*), Технический директор Photometric Solutions International, Австралия  
**Г. Бизяк** (*Grega Bizjak*), Люблянский университет, Словения  
**Л. Билунд** (*Lars Bylund*), Bergen's School of architecture, Норвегия  
**П.Р. Бойс** (*Peter R. Boyce*), Lighting Research Center, США  
**П. Блаттнер** (*Peter Blattner*) Федеральный Институт Метрологии METAS, Швейцария  
**В. ван Боммель** (*Wout van Bommel*), Philips Lighting, Нидерланды  
**А.А. Богданов**, к.т.н., ОАО «ИНТЕР РАО Светодиодные Системы», С.-Петербург  
**А.С. Букатов**, ГУП «Моссвет»  
**Н.В. Быстриянцева**, к. арх., Университет ИТМО, С.-Петербург  
**Л.П. Варфоломеев**, к.т.н., Москва  
**Д. Вейтч** (*Jennifer Veitch*), National Research Council of Canada, Канада  
**А.А. Григорьев**, д.т.н., НИУ «МЭИ», Москва  
**С. Дарула** (*Stanislav Darula*), Academy Institute of Construction and Architecture, Словакия  
**О.Е. Железникова**, к.т.н., МГУ им. Н.П. Огарёва, Саранск  
**Е.А. Заева-Бурдонская**, канд. искусствоведения, МГХПА им. С.Г. Строганова  
**П.П. Зак**, д.б.н., проф., ИБХФ РАН, Москва  
**Т. Казанасмаз** (*Tugce Kazanasmaz*), Измирский технологический институт, Турция

**А.А. Коробко** к.т.н., БЛ Групп, Москва  
**С. Мазумдар** (*Saswati Mazumdar*), университет Джадавпур, Индия  
**Д.Н. Макаров**, к.т.н., ЗАО «Точка Опоры»  
**Д.А. Мельников**, Министерство Энергетики РФ, Москва  
**Э. Миллс** (*Evan Mills*), Lawrence Berkeley Laboratory, США  
**Л.Г. Новаковский**, к.т.н., ООО «Фарос-Алеф»  
**Й. Оно** (*Yoshi Ohno*), NIST Fellow, (Президент МКО в 2015–2019 гг.), США  
**А.Т. Овчаров**, д.т.н., проф., ТГАСУ, Томск  
**Л.Б. Прикупец**, к.т.н., ВНИСИ им. С.И. Вавилова, Москва  
**Л.Р. Ронки** (*Lucia R. Ronchi*), Higher School of Specialization for Optics, University of Florence, Италия  
**А.А. Рябцева**, д.м.н., проф., МОНИКИ, Москва  
**А.К. Соловьёв**, д.т.н., проф., НИУ «МГСУ», Москва  
**К.А. Томский**, д.т.н., проф., СПбГИКИТ, С.-Петербург  
**П. Торнс** (*Peter Thorns*), Zumtobel Group, Австрия  
**Г. Циссис** (*Georges Zissis*), университет Тулузы, Франция  
**А.Г. Шахпарунианц**, к.т.н., генеральный директор ВНИСИ им. С.И. Вавилова, Москва  
**Н.И. Щепетков**, д. арх., проф., МАРХИ (ГА), Москва

**РЕДАКЦИЯ ЖУРНАЛА**

Генеральный директор  
**Н.С. Шерри**; sherri@bl-g.ru  
Старший научный редактор  
**Т.В. Мешкова**; mtv@l-e-journal.com  
Научный редактор  
**С.Г. Ашурков**; ashurkov@l-e-journal.com

Шеф-редактор  
**Ю.Б. Айзенберг**, д.т.н., проф., академик АЭН РФ

Главный редактор  
**В.П. Будаков**, д.т.н., проф., академик АЭН РФ; budakov@l-e-journal.com

Зам. главного редактора и научный редактор англоязычной версии  
**Р.И. Столяревская**, д.т.н.; stoly@l-e-journal.com

Научный редактор  
**А.Ю. Басов**; basov@bl-g.ru  
Выпускающий редактор  
**П.А. Федорищев**; fpa@l-e-journal.com  
Зав. редакцией  
**М.И. Титаренко**; titarenko@l-e-journal.com  
Стилист английской версии  
**М.Д. Виноградова**  
Секретарь редакции  
**Е.А. Булгакова**; bulgakova@l-e-journal.com  
Дизайнер-верстальщик  
**А.М. Богданов**  
Контент-менеджер  
**Е.С. Серый**

**ИНОСТРАННЫЕ КОРРЕСПОНДЕНТЫ**

**Аргентина**  
Пабло Икстайна (*Pablo R. Ixtaina*), Национальный технологический университет Ла-Платы;  
**Франция**  
Георг Циссис (*Georges Zissis*), университет Тулузы;  
**Индия**  
Сасвати Мазумдар (*Saswati Mazumdar*), университет Джадавпур;  
**Словения**  
Грега Бизяк (*Grega Bizjak*), Люблянский университет;  
**Турция**  
– Тугче Казанасмаз (*Tugce Kazanasmaz*), Измирский технологический институт;  
– Эрдал Шехирли (*Erdal Sehirlı*), университет Кастамону;  
– Ренгин Юнвер (*Rengin Unver*), Технологический университет Йылдыз (Стамбул)

Перепечатка статей и материалов из журнала «Светотехника» – только с разрешения редакции.

За содержание и редакцию информационных материалов ответственность несет источник информации.

Мнение редакции не всегда совпадает с мнением авторов статей

Сдано в набор 28.08.20. Подписано в печать 07.10.20  
Формат 60×88 1/8. Печ.л. 10,00. Тираж 1200

Отпечатано в типографии ООО «Группа Компаний Море»  
101898, Москва, Хохловский пер., д. 9

129626, Москва, проспект Мира, 106, ВНИСИ, оф. 327; Тел. 7(495)682–26–54; 7(499)706–80–65; Тел./факс: 7(495)682–58–46

E-mail: info@l-e-journal.com; Интернет: www.l-e-journal.com; Электронная версия журнала: www.elibrary.ru

# СОДЕРЖАНИЕ 5·2020

В НОМЕРЕ

СЕНТЯБРЬ • ОКТЯБРЬ

|  |                          |  |                  |
|--|--------------------------|--|------------------|
| <b>Колонка</b> главного редактора.....   | <b>4</b>                 | <b>Захид М.А., Чаван Г.Т., Чо Я.Х., Ы Дж.</b> Расчёт оптимального угла наклона для выработки максимальной энергии от солнечной панели с использованием моделей ясного неба и интенсивности падающих лучей..... | <b>67</b>        |
| <b>Бизнес и инновации</b> .....  | <b>8, 28, 51, 60, 78</b> |  |                  |
| <b>Блаттнер П.</b> О нынешней и будущей деятельности Международной комиссии по освещению .....   | <b>5</b>                 | <b>Маняхин Ф.И., Мокрецова Л.О.</b> Физико-математическая модель зависимости внутренней квантовой эффективности от тока светодиодов с квантовыми ямами от тока.....  | <b>73</b>        |
| <b>Абрамов А.В., Богданов А.А., Данилко А.В., Дмитриев П.Б., Карев А.В., Степанов А.В.</b> Методика измерения пусковых токов в осветительных приборах со светодиодами..... | <b>9</b>                 | <b>ХРОНИКА</b>   |                  |
| <b>Эфе С.Б., Вархан Д.</b> Внутреннее освещение исторического здания с помощью светодиодных технологий на примере мечети Фейт Паша.....                                    | <b>15</b>                | <b>Айзенберг Ю.Б.</b> Полые световоды – одно из новых направлений развития светотехнической науки и техники (мемуарно-обзорная статья).....  | <b>79</b>        |
| <b>Дворецкий А.Т., Сергейчук О.В., Спиридонов А.В.</b> Солнечные карты в проектировании солнцезащитных устройств общего положения.....                                     | <b>21</b>                | <b>Потапова Н.В.</b> Увидеть невидимое!.....   | <b>91</b>        |
| <b>Нестёркина Н.П., Журавлёва Ю.А., Коваленко О.Ю., Микаева С.А.</b> Сравнительный анализ характеристик светодиодных филаментных ламп для бытового освещения.....          | <b>25</b>                | <b>Мешкова Т.В.</b> Всероссийская научно-практическая конференция по светотехнике.....   | <b>94</b>        |
| <b>Ким Ц.-Т., Ким Ч.-Х.</b> Исследование безопасности и светотехнических параметров светодиодной лампы прямой замены.....  | <b>29</b>                | <b>Лесман Е.А.</b> Световое шоу в Санкт-Петербурге.....  | <b>95</b>        |
| <b>Калошин Г.А., Будак В.П., Шишкин С.А., Жуков В.В.</b> Влияние рассеянного излучения на возможности наведения по лазерному пучку.....                                    | <b>38</b>                | <b>Новые книги по светотехнике</b> .....   | <b>96</b>        |
| <b>Леонидов А.В.</b> Методика определения эффективных режимов воздействия оптического излучения при управлении циркадианной активностью организма человека.....            | <b>44</b>                | <b>ИНФОРМАЦИОННЫЕ МАТЕРИАЛЫ</b>  |                  |
| <b>Жбанова В.Л.</b> Оценка и подбор цветовых пространств для цифровых систем .....   | <b>53</b>                | <b>Ультрафиолетовые</b> облучатели ЛЗСИ .....  | <b>1</b>         |
| <b>Сенгиз М.С., Йеткин С.</b> Расчёт теплового менеджмента уличных светильников со светодиодами.....   | <b>61</b>                | <b>Светлые</b> решения для умного города от МСК БЛ Групп .....   | <b>36</b>        |
|  |                          | <b>Светосервис-СПб:</b> светотехнические проекты любого уровня сложности.....  | <b>52</b>        |
|  |                          | <b>Световое шоу,</b> прошедшее 3 сентября 2020 г. в Санкт-Петербурге .....   | <b>1 с. обл.</b> |
|  |                          | <b>Оpora Engineering:</b> качество, надёжность, оперативность.....   | <b>2 с. обл.</b> |
|  |                          | <b>Светосервис-Подмосковье:</b> Инновационные решения в освещении для столицы и регионов.....  | <b>3 с. обл.</b> |
|  |                          | <b>Стоимость</b> подписки на 2021 год .....  | <b>4 с. обл.</b> |

# Уважаемые читатели!



**В.П. Будак**  
д.т.н., проф.,  
академик АЭН РФ  
BudakVP@gmail.com

На сегодня среди проектировщиков осветительных установок существует хлёсткий девиз: «Люксы не значат ничего!» Говоря иначе, главное в освещении – не количественные показатели, а качество освещения. Наиболее последовательно это нашло отражение в модной ныне в мире теме «*Human centric lighting*» (*HCL*), что можно перевести как «ориентированное на человека освещение». Нельзя не признать, что это довольно неуклюжее выражение, потому что освещение всегда было человеческим, но звучит оно всё чаще и чаще. По-видимому, здесь имеется в виду освещение, которое учитывает как зрительные, так и незрительные эффекты воздействия света на людей, что создаёт визуальную среду, соответствующую комфорту и настроению человека для его здоровья, работы, обучения и досуга.

Прежде всего надо отметить то, что мы знаем о восприятии света человеком. Про незрительное влияние известно, что существуют важные эффекты воздействия через циркадную временную систему, однако сегодня мы подозреваем, что свет влияет и на другие области мозга, но они ещё пока малоизучены. Мы уверенно знаем, как свет влияет на зрительное восприятие, однако мы очень приблизительно можем выразить это понимание в терминах фотометрических величин. При этом нельзя не отметить, что многие результаты, такие как улучшение здоровья, ускорение обучения и увеличение продаж, определяются многими факторами, где освещение – лишь один из них.

Поэтому освещение, ориентированное на человека – это новая область, которую нужно исследовать. В настоящее время преждевременно говорить о нём, как о новой технологии освеще-

ния. Сегодня это скорее некая философия в области освещения.

Эти вопросы появились после недавнего заседания НТС, где разгорелись жаркие дискуссии о том, что качественные показатели освещения, понятие комфортного освещения должны присутствовать во всех стандартах на светотехнические изделия. С учётом того, что мы пока ещё плохо умеем выражать даже зрительное действие света в терминах фотометрических величин, такое требование звучит как благое пожелание. Более того, само понятие освещения применимо к осветительным установкам (ОУ), а к осветительным приборам оно звучит более чем условно, поскольку комфорт зависит не только от самих приборов, но их расположения в ОУ, режимах питания, сочетания естественного и искусственного в комбинированном освещении. Применение понятия «комфортного освещения» к осветительному прибору напрямую звучит, скорее, как рекламный ход для продажи клиенту чего-то ненужного.

Другим вопросом острой дискуссии на заседании НТС был вопрос цветопередачи, где прозвучало, что индекс цветопередачи устарел и нужно задавать её непосредственно в эллипсах Мак Адама. Не отрицая необходимости уточнения параметров, определяющих цветопередачу, всё же хочется сделать несколько важных замечаний. Эллипсы Мак Адама не являются мировыми константами, выражающимися через заряд электрона, скорость света и т.д., а получены экспериментально для зрительного восприятия наблюдателей при определённых условиях углового размера объекта и яркости адаптации. Переход к другим условиям наблюдения требует использования либо *CAT/CAM* (*Chromatic Adaptation Transform / Color Appearance Model*), либо равноконтрастной системы. Особенно это касается приборов на основе СД, где диапазон яркостей составляет несколько порядков.

Применение функциональной зависимости в принципе крайне затруднительно в практической деятельности. В математике для оценки расстояния между функциями вводится пространство. Неизбежно это необхо-

димо определить для оценки цветопередачи. В этом смысле индекс цветопередачи и является такой оценкой цветовых искажений в равноконтрастном пространстве *CIE Luv*. Общий индекс цветопередачи  $R_a$  даёт усреднённую характеристику по специальным индексам цветопередачи  $R_i$  для 8 образцов средней насыщенности, где  $R_i = 100 - 4.6\Delta E_i$ , а  $\Delta E_i$  – цветовой сдвиг (расстояние) в системе *CIE Luv*. Несомненно, можно и нужно с учётом требований практики изменять набор образцов, но противоречий индекса цветопередачи с эллипсами Макадама нет.

С 22 по 25 сентября в г. Санкт-Петербург в Университете ИТМО прошла Юбилейная 30-я международная конференция по компьютерной графике и машинному зрению (<https://graphicon.itmo.ru/>), где очень интересной была секция «Компьютерная графика в материаловедении, светотехнике и дизайне». По моему субъективному восприятию, секция была лучшей на конференции, где обсуждались вопросы применения компьютерной графики (КГ) для моделирования осветительных установок. Немало было уделено вопросам новой специальности, которую рождает современная практика проектирования ОУ – светодизайн. К уже утвердившейся истине, что КГ может стать инструментом в формировании дизайнера, как в своё время был карандаш, было показано, что КГ является отличным методическим инструментом в обучении дизайнеров вопросам фотометрии. Можно обойтись без формул, а наглядно на основе компьютерной визуализации показать определение всех основных фотометрических величин.

Однако наряду с восхищением многими интересными результатами, представленными на конференции, осталось чувство, что наука мельчает. Очень много обсуждалось созданных программ на базе открытых библиотек, работа которых вызывает искреннее восхищение, но практически исчезли теоретические и экспериментальные исследования. Как бы науку съел компьютер. Остаётся вопрос: временное ли это явление или устойчивая тенденция цифровой эпохи.

# О нынешней и будущей деятельности Международной комиссии по освещению

П. БЛАТТНЕР

Международная комиссия по освещению, Вена, Австрия  
E-mail: peter\_blattner@bluewin.ch

## Аннотация

Рассмотрены основные направления деятельности Международной комиссии по освещению (МКО) за последние годы. Перечислены наиболее важные публикации, отражающие последние тенденции развития светотехнической отрасли, включая методы испытаний светодиодных источников света и осветительных приборов, колориметрические измерения, способы оценки зрительного дискомфорта при искусственном освещении, а также интеллектуальное управление освещением. Отдельное внимание уделяется работе МКО в направлениях метрологии и учёта влияния освещения на незрительные функции организма человека. Для эффективного взаимодействия в интенсивно развивающейся области облучения растений создаётся специальный объединённый комитет, занимающийся разработками соответствующих стандартов. В текущей ситуации, сложившейся в результате пандемии COVID-19 особую актуальность приобретают исследования проблем использовании ультрафиолетового (УФ) излучения для дезинфекции и снижения риска передачи вируса. Не менее важное значение МКО придаёт стандартизации в области фундаментальных основ светотехники, включая метрологию и специальную терминологию, а также вопросам современного светотехнического образования. В последнее время вопрос открытости научных публикаций приобретает

большую актуальность. В связи с этим руководство комиссии предпринимает определённые шаги в этом направлении, работая над оцифровкой своих материалов и обеспечивая специалистам свободный доступ к отдельным документам.

**Ключевые слова:** МКО, стандарты, фотометрические измерения, фитоблучение, светотехника.

С большим уважением и ответственностью, а также с не меньшим удовольствием я принял на себя руководство Международной комиссией по освещению, выдающейся и авторитетной организацией, основанной в 1913 году светотехническими обществами нескольких стран.

В последние годы светотехническая отрасль переживает бурный период. Технологические и структурные преобразования оказывают непосредственное влияние на работу МКО. Светодиоды массово заменяют традиционные источники света. В соответствии с этим обстоятельством, МКО адаптировала многие свои директивы и рекомендации. Вот некоторые примеры:

– CIE S025:2015 [1] Метод испытаний светодиодных ламп, светодиодных светильников и светодиодных модулей: это первый согласованный международный стандарт, описывающий правила измерения светодиодных источников света. Этот стандарт также включает в себя рекомендации относительно неопределённостей (погрешностей), которые ещё не в полной

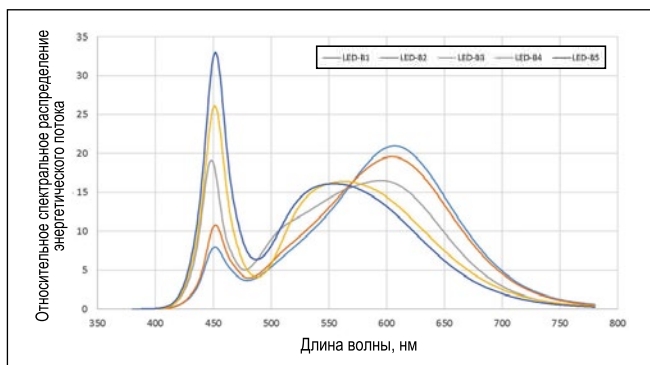
мере установлены в отрасли. Исходя из этого, МКО предложила провести несколько обучающих тренингов, в том числе очень успешное мероприятие, прошедшее в Москве, которое было организовано в сотрудничестве с ВНИСИ им. Вавилова в ноябре 2018 года. Кроме того, недавно было опубликовано дополнение, касающееся органических светодиодов (OLED) [2].

– CIE 015:2018 Колориметрия, 4 издание [3]: Настоящий документ содержит основные рекомендации МКО, касающиеся цветовых измерений. В частности, он включает рекомендации по использованию стандартных колориметрических наблюдателей и стандартных излучателей, описание эталона для измерения характеристик отражения, координаты цветности, координаты цветового пространства и цветовых различий, а также другие методы измерений и расчётов в колориметрии. В последнем издании этого документа представлены новые стандартные излучатели для различных типов светодиодов (рис. 1). Кроме того, в него включены новые данные о функциях сложения трехкомпонентного колбочкового зрительного анализатора на основе CIE 170–1 [4] и CIE 170–2 [5].

– CIE 232:2019 Дискомфорт, вызванный бликами от светильников с неравномерной яркостью [6]: использование светодиодов позволяет проектировать и реализовывать эстетически красивые, но технически сложные светильники. Среди всего прочего, светораспределение, спектральный состав, а также светящиеся поверхности могут варьироваться в широком диапазоне, ограничиваясь практически только желанием производителя. Однако, если это сделано неправильно, возникают яркие пятна и блики, вызывающие зрительный дискомфорт. В докладе CIE 232 впервые даётся рекомендация о том, как оценить яркость неравномерно освещённых поверхностей. Этап оценки блескости источника света неравномерной яркости показан на рис. 2.

Технологическая революция в области светотехники и освещения была первоначально вызвана повышением световой отдачи источников света. Однако поскольку по физическим причинам световая отдача не может быть увеличена бесконечно, важным способом повышения энергоэффек-

Рис. 1. Относительное спектральное распределение энергетического потока стандартных светодиодных излучателей по стандарту CIE 15:2018 [3]



тивности является интеллектуальное управление системами освещения. Оно включает в себя регулирование потока источников света, а также наличие интеллектуальных датчиков. В этом взаимосвязанном мире для МКО важно чётко позиционировать себя и решать такие вопросы, как динамическое или управляемое освещение, для чего МКО создала новый технический комитет TC4–62 Адаптированное Дорожное Освещение. Задача этого комитета состоит в том, чтобы анализировать потребности, вырабатывать рекомендации, развивать методологию и способствовать применению адаптивного дорожного освещения.

Светотехническая отрасль ввела термин «*Human Centric Lighting*» для описания незрительного воздействия света на человека, вызванного или поддерживаемого фоточувствительными ганглиозными клетками сетчатки (*iPRGC*). Лично я предпочитаю термин «интеграционное освещение», который используется в МКО и ИСО (*ISO*). Он представляет многогранность воздействия света и освещения, а именно сочетание зрительных и незрительных эффектов для получения физиологической и/или психологической пользы для человека. С введением в действие Международного стандарта *CIE S026:2018* МКО «Система метрологии оптического излучения для реакции на свет под влиянием *ipRGC*» [7] МКО создала важную основу для использования разными заинтересованными сторонами одних и тех же терминов и параметров. Теперь речь идёт о принятии этих параметров в исследовательском сообществе и, таким образом, о получении результатов, которые могут быть использованы на благо человека. В качестве важного инструмента я отмечаю исследовательскую стратегию МКО, которая использует перспективный подход к основным темам в нашей области.

Но тема света не заканчивается интеграционным освещением для человека. Оптическое излучение используется также для освещения растений или дезинфекции. Помимо грамотного использования оптического излучения, речь также идёт о минимизации негативных эффектов, например, светового загрязнения или фотобиологического повреждения.

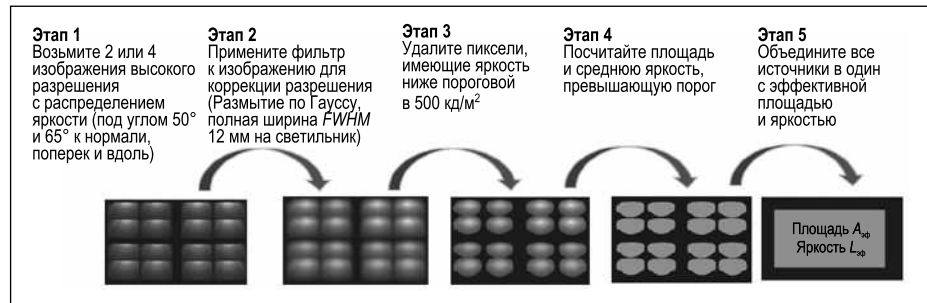


Рис. 2. Этапы измерения и обработки изображений, необходимые для получения эффективной проекционной области и эффективной яркости, используемой для прогнозирования блеска неоднородного источника света в соответствии с *CIE 232:2019* [6] (© *CIE*)

С большим удовольствием я принял к сведению инициативу Российского Национального Комитета МКО по содействию стандартизации в области фитооблучения. В связи с этим МКО в настоящий момент работает над организацией нового Совместного Технического Комитета, и я надеюсь, что многие российские эксперты смогут принять участие в этой важной деятельности и внести свой вклад. Я очень хорошо помню первую Международную научно-техническую конференцию по освещению теплиц, успешно организованную и проведённую в сентябре 2019 года в Москве.

Пандемия коронавируса оказала влияние и на деятельность МКО в этом году, и послужила серьёзным поводом к публикации заявления о позиции МКО по использованию ультрафиолетового (УФ) излучения для снижения риска передачи *COVID-19*. Использование бактерицидного УФ-излучения является серьёзным вмешательством в окружающую среду, которое может уменьшить распространение вируса контактным способом, а также передачу различных вирусных и бактериальных инфекций воздушным путём. Тем не менее, бактерицидное УФ-излучение должно применяться с учётом дозы и с соблюдением необходимых мер безопасности. Неправильное применение бактерицидного излучения может негативно отразиться на здоровье и повлиять на безопасность человека или привести к недостаточной дезактивации инфекционных агентов. В этой связи применение бактерицидных излучателей в домашних условиях не рекомендуется, и их также никогда не следует использовать для дезинфекции кожи, за исключением случаев, когда это клинически оправдано. При содействии различных национальных комитетов заявление с изложением пози-

ции МКО по этому вопросу было переведено на многие языки, включая русский. Кроме того, МКО выпустила две публикации в открытом доступе (*CIE 187:2010 UV-C* «Риск возникновения фотокарциногенеза (рака кожи) в результате воздействия бактерицидных ламп» [8] и *CIE 155:2003* «Ультрафиолетовая дезинфекция воздуха» [9]) для поддержки международного сообщества в борьбе с вирусом. Оба издания также были переведены на русский язык.

МКО – это не только глобальная организация, занимающаяся наукой и технологиями света и освещения. Она также является организацией по стандартизации с момента основания. Международно признанные стандарты создаются благодаря сотрудничеству экспертов из различных национальных комитетов. МКО была первой и по-прежнему является одной из немногих организаций, разрабатывающих стандарты, признанные Международной организацией по стандартизации (ИСО). Сотрудничество с ИСО, в частности с ИСО TC274 «Свет и освещение», определяется в *PSOD*, который был возобновлён в прошлом году. МКО отвечает за мировую стандартизацию фундаментальных основ, включая метрологию и словарь, в то время как *ISO TC274* фокусируется на стандартизации в области применения. Кроме того, МКО также тесно сотрудничает с Международным Электротехническим Комитетом (МЭК), в частности с МЭК ТК 34 и МЭК ТК 76. Работа комитетов МЭК по стандартизации сосредоточена на безопасности товаров и производительности. Примером успешного сотрудничества с МЭК является важный стандарт безопасности ламп и светильников *IEC 62471/CIE S009* [10], который был разработан в МКО и затем опубликован в качестве стан-



дарт с двойным логотипом. Эксперты также совместно работают над пересмотром Международного светотехнического словаря [11], последнее издание которого будет опубликовано в ближайшее время и полностью согласовано с IEC 60050–845 (Международный электротехнический словарь) [12]. Это очень важная работа, потому что для устранения двусмысленностей и неопределённостей необходимо общее понимание смысла слов. Поэтому важно, чтобы эта всеобъемлющая работа была переведена на как можно большее число языков. Важную роль в этом отношении играют также национальные комитеты МКО. Однако язык не является чем-то статичным, он постоянно развивается, особенно по мере исследования новых областей. Самым последним примером является направление фитооблучения, работа над которым ведётся совместно с МЭК ТК 34.

МКО также имеет соглашение с Международным комитетом мер и весов (МКМВ), в котором признаются соответствующие компетенции. В частности, МКО признаёт роль МКМВ в отношении определения единиц (системы СИ), тогда как МКМВ признаёт, что МКО отвечает за определение величин и спектров действия в области фотометрии, фотобиологии и фотохимии. В связи с этим МКО внесла большой вклад в подготовку девятого издания Брошюры СИ, в частности приложения 3 о фотобиологических и фотохимических величинах [13]. В дополнение к этому 20 мая 2019 года была обновлена совместная публикация «Принцип, регулирующий фотометрию» [14, 15], в которой были отражены коренные изменения Международной системы единиц, концепция семи базовых единиц была заменена системой, которая основана на семи определяющих константах, включая константу для световой эффективности монохроматического излучения частотой  $540 \cdot 10^{12}$  Гц,  $K_{Cd}$ .

Область света и освещения становится все более междисциплинарной, поэтому МКО создала возможность горизонтальных (совместных) Технических комитетов (JTC). В последнее время число СТК значительно возросло. Управление этой структурой сопряжено с определёнными трудностями, и, возможно, для этого потребуется внести изменения в Про-

цессуальный кодекс. Эффективное взаимодействие между различными отделами имеет важное значение не только в МКО, но и в национальных комитетах. И вновь важное значение имеет эффективное взаимодействие между всеми заинтересованными экспертами. В этом контексте я хотел бы отметить недавно созданный Совместный Технический Комитет JTC18 «Светотехническое образование». Как мы все знаем, освещение переживает исторические технологические изменения. Поэтому очень важно, чтобы эти всеобъемлющие изменения также учитывались при подготовке и обучении новых специалистов в этой области. Цель нового СТК заключается в пересмотре и обновлении устаревшего технического доклада CIE 99:1989 «Светотехническое образование (1983–1989)» [16] и вынесении рекомендаций по учебным программам для высшего образования и повышения квалификации. Комитет предложит рекомендации по обучению специалистов в области освещения, а также варианты улучшения и поддержки непрерывного образования на протяжении всей профессиональной деятельности светотехников.

Однако мы не должны забывать и о прогрессе в традиционно сложившихся областях МКО. Нынешние колориметрические концепции основаны на исследованиях, которые были проведены почти сто лет назад. Фактически, на своей восьмой сессии в 1931 году МКО определила стандартные излучатели, функции сложения стандартного колориметрического наблюдателя и стандартные диаграммы цветности. С тех пор исследования в области цветного зрения достигли огромного прогресса. Цветовое ощущение возникает в результате физиологических процессов, первый из которых – поглощение фотонов колбочками сетчатки. Для точного определения цветового стимула от заданного спектрального распределения энергетического потока должны быть точно известны функции чувствительности колбочек. Часть 1 CIE 170 предоставляет научному сообществу фундаментальные основы, которые представляют собой относительные спектральные чувствительности различных типов колбочек – чувствительных к длинноволновому (LWS), средневолновому (MWS) и коротковолновому излучению (SWS), измерен-

ные при попадании излучения в глаз. Часть 2 CIE 170 предоставляет пользователю практически колориметрические инструменты в виде диаграмм цветности. Она включает в себя связь между колориметрией и физиологией. Начиная с функций спектральной эффективности колбочек, стало возможно переопределение новых цветовых пространств включая трехкомпонентное пространство LMS МакЛеода – Бойнтонна. При этом, поскольку модель основана на физиологии, можно рассчитать реакцию для «нестандартных» наблюдателей, то есть для разного возраста, с различными размерами поля зрения и даже рассчитать новую, основанную на чувствительности колбочек, спектральную функцию световой эффективности  $V(\lambda)$  или другие производные цветовые величины.

В области фотометрии в комитете TC2–90 обсуждается изменение стандартного спектра, используемого для калибровки фотометров, и замена лампы накаливания на стандартный светодиодный источник. Изменение эталонного спектра окажет огромное влияние на многие заинтересованные стороны, включая производителей осветительных приборов, измерительные лаборатории, национальные метрологические институты и простых пользователей. Поэтому предполагается предложить спектр светодиодов в дополнение к существующему стандартному излучателю типа A, и оба спектра будут использоваться для целей калибровки.

Повышенная активность наблюдается также в области описания и измерения характеристик внешнего вида поверхностей и материалов. Технический комитет TC 2–85 готовит рекомендацию по геометрическим параметрам для измерения функции распределения двунаправленного отражения (*Bidirectional Reflectance Distribution Function, BRDF*). Комитет TC 2–94 занимается вопросами измерения полного коэффициента пропускания, диффузного коэффициента пропускания и коэффициента пропускания в мутной среде. Совместный технический комитет JTC12 (D2/D1/D8) обсуждает проблемы измерения искристости и зернистости, и, наконец, совместный комитет JTC17 (D1/D2/D8) – вопросы измерения и восприятия блескости. Этот последний комитет подготовит основу для определения и стандартизации визу-

альных характеристик глянцевых поверхностей.

Наконец следует отметить, что в области доступности публикаций в предстоящие годы нужно быть готовым к некоторым проблемам. Призыв к открытому доступу усиливается и связанные с этим процедуры становятся все более жёсткими. Некоторые государственные научно-исследовательские учреждения просят, чтобы результаты исследований, финансируемые за счёт государственных средств, стали общедоступными. МКО делает шаг в этом направлении, обеспечивая свободный доступ к отдельным документам сессии МКО в Вашингтоне. Помимо открытого доступа к экспертным знаниям, сложной задачей, предоставляющей новые возможности для МКО, является оцифровка документов. Важно использовать новые формы цифровых продуктов, включая проверенные средства расчёта, приложения, базы данных, машиночитаемые документы и т.д. Цифровизацию продуктов, встреч и событий, очевидно, стимулирует нынешняя чрезвычайная ситуация, вызванная пандемией коронавируса.

МКО является не только международным форумом для обсуждения всех вопросов, касающихся науки, технологии и искусства света и освещения, но и не стоит забывать, что прежде всего это зонтичная организация национальных ассоциаций в области света и освещения. МКО – поразительная организация. Она базируется на большом разнообразии специалистов, входящих в неё, и их опыте. Я с нетерпением жду продолжения работы со всеми экспертами, живущими и работающими по всему миру, и надеюсь лично встретиться со многими коллегами в период моего пребывания на посту Председателя МКО.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. CIE S025:2015 Test Method for LED Lamps, LED Luminaires and LED Modules, Vienna, 2015.
2. CIE S025-SP1:2019 Test Method for OLED Luminaires and OLED Light Sources, DOI: 10.25039/S025-SP1.2019, Vienna, 2019.
3. CIE 015:2018 Colorimetry, 4th Edition, ISBN: 978–3–902842–13–8, DOI: 10.25039/TR.015.2018, Vienna, 2018.
4. CIE 170–1: 2006 Fundamental chromaticity diagram with physiological axes – Part 1, ISBN: 978 3901906 46 6, Vienna 2006.
5. CIE 170–2:2015 Fundamental Chromaticity Diagram with Physiological Axes – Part

2: Spectral Luminance Efficiency Functions and Chromaticity Diagrams, ISBN: 978–3–902842–05–3, Vienna, 2015.

6. CIE 232:2019 Discomfort Caused by Glare from Luminaires with a Non-Uniform Source Luminance, ISBN: 978–3–902842–15–2 DOI: 10.25039/TR.232.2019, Vienna 2019.

7. CIE S026:2018 CIE System for Metrology of Optical Radiation for ipRGC–Influenced Responses to Light, DOI: 10.25039/S026.2018, Vienna, 2018.

8. CIE 187:2010 UV–C Photocarcinogenesis Risks from Germicidal Lamps, ISBN: 978 3901906 81 7, Vienna 2010.

9. CIE 155:2003 Ultraviolet Air Disinfection [8], ISBN: 978 3901906 25 1, Vienna 2003.

10. IEC 62471:2006/CIE S009:2002 Photobiological safety of lamps and lamp systems., Geneva 2006.

11. CIE S017/E:2011 International Lighting Vocabulary (ILV), also available at <http://cilv.cie.co.at/>, Vienna 2011.

12. IEC 60050–845: 1987 (the International Electrotechnical Vocabulary, IECV), Geneva, 1987. Also available at <http://www.electropedia.org>

13. BIPM, 9<sup>th</sup> edition SI-Broschure, ISBN978–92–822–2272–0, Sèvres, 2019. Also available at <https://www.bipm.org/en/publications/si-broschure/>

14. BIPM/CIE, «Principle Governing Photometry» Rapport BIPM-2019/05, Sèvres, 2019.

15. CIE 018:2019 The Basis of Physical Photometry, 3rd Edition ISBN978–3–902842–24–4, DOI: 10.25039/TR.018.2019, Vienna 2019.

16. CIE 99:1989 Lighting education (1983–1989), ISBN: 978 3900734 36 7, Vienna 1989.



**Пупер Блаттнер**  
(Peter Blattner), Ph. D.  
В 1992 г. окончил, а в 1998 г. получил степень Ph. D. в области физики в Университете Невшателя, Швейцария. С 2000 г. возглавляет Лабораторию оптики

Швейцарского Федерального Института Метрологии, с 2019 г. – президент Международной комиссии по освещению. Член и консультант целого ряда международных и европейских организаций, автор более 80 публикаций и 20 докладов, правообладатель 2 патентов на изобретения

## От редакции

Редакция журнала «Светотехника / Light & Engineering» горячо приветствует члена своей редакционной коллегии д-ра Блаттнера, действующего Президента МКО с 2019 года, и надеется на плодотворное сотрудничество МКО с российским изданием, а также с Российским национальным комитетом МКО.

## Гибкие солнечные элементы с рекордным КПД напечатали на принтере

Значимого прогресса в создании нового поколения многофункциональных, гибких и лёгких солнечных элементов (СЭ) добились учёные из Саудовской Аравии. Они разработали полимерные чернила и метод печати с рекордным для этого класса фотоэлементов КПД. Их можно будет использовать для питания носимой электроники, в частности, медицинских сенсоров.

До сих пор сверхтонкие органические СЭ производились методами центрифугирования или термального напыления, но эти технологии не масштабируются и ограничивают геометрию фотоэлементов. В качестве электрода эти методы используют прозрачный и проводящий, но хрупкий и жёсткий материал оксид индия-олова.

Команда инженеров из Научно-технологического университета им. короля Абдаллы разработала чернила для печати СЭ – прозрачных, гибких и проводящих.

За основу они взяли полимер полистиролсульфонат. Между слоями электродов находится органический фотогальванический материал. Всё устройство целиком можно покрыть париленом, гибким, водосталкивающим и биосовместимым материалом.

Хотя струйная печать – очень дорогая и удобный для масштабирования метод производства, разработка функциональных чернил оказалась непростым делом. Следовало преодолеть межмолекулярные силы между картриджом и чернилами, чтобы получать очень мелкие капли из крошечного сопла. Также важную роль играют растворители, поскольку процесс высыхания влияет на качество плёнки.

После оптимизации состава чернил для каждого слоя учёные напечатали СЭ на стекло, чтобы проверить их производительность. И добились КПД в 4,73 %, побив предыдущий рекорд для полностью напечатанных фотоэлементов (4,1 %). Также впервые была достигнута возможность печати на сверхтонкой гибкой подложке с КПД в 3,6 %.

nanonewsnet.ru/  
30.08.2020

# Методика измерения пусковых токов в осветительных приборах со светодиодами

А.В. АБРАМОВ, \*А.А. БОГДАНОВ, А.В. ДАНИЛКО, П.Б. ДМИТРИЕВ,  
\*\*А.В. КАРЕВ, А.В. СТЕПАНОВ

ООО «МГК «Световые Технологии», Москва/СПб  
E-mail: bogdanov@interra-led.com\*, a.karev@ltcompany.com\*\*

## Аннотация

Рассматривается способ разрешения ситуации, сложившейся со вступлением в силу требований к уровню пусковых токов применительно к осветительным приборам (ОП) со светодиодами (СД). На момент создания статьи аттестованная методика объективного измерения пускового тока, как и стандартизированное определение понятия «пусковой ток» в нашей стране отсутствовали. Авторами разработана и практически апробирована методика измерения переходных процессов в момент включения ОП, позволяющая объективно характеризовать его пусковой ток.

Введены соответствующие термины и определения. Систематизированы и описаны переходные процессы, наблюдаемые в ОП в момент включения. Представлен состав и сформулированы требования к испытательному оборудованию для измерения пускового тока. Описан порядок испытаний и последовательность оценки их результата. Показаны особенности анализа импульсов пускового тока и определена точность предлагаемого метода испытаний.

Особое внимание уделено ключевому элементу испытательной установки – блоку синхронизатора запуска, который при испытаниях ОП и измерении параметров пускового тока обеспечивает наиболее критичный вариант включения, а именно включение в момент максимальных значений напряжения питания. Столь строгая фиксация момента включения позволяет минимизировать погрешности измерений и обеспечивать приемлемую воспроизводимость результатов.

Делается вывод, что при условии аттестации предлагаемой методики и включения её в перечень рекомендуемых к использованию, станет возможным определение необходимых параметров импульсов пускового тока ОП, достаточных для рационального

проектирования систем электроснабжения ОУ. Тем самым снимется существующая сегодня неопределённость в вопросе измерения пусковых токов. Кроме того, соблюдая единообразие в подходе, методика позволит сформировать статистику по реальным значениям пусковых токов в системах электропитания ОУ на реальных объектах и уже на её основе установить критерии качества для значений пусковых токов отдельных видов ОП.

**Ключевые слова:** осветительный прибор, светодиоды, пусковой ток, амплитуда пускового тока, длительность пускового тока, импульс тока, момент включения, переходный процесс, измерительная установка, блок синхронизации запуска, интеграл Джоуля, проектирование систем, системы электропитания осветительных установок.

## Введение

Как известно, с 1 января 2020 г. вступили в силу положения второго этапа Постановления Правительства РФ от 10 ноября 2017 г. N1356 «Об утверждении требований к осветительным устройствам и электрическим лампам, используемым в цепях переменного тока в целях освещения» (далее – Постановление) в редакции изменения от 3 ноября 2018 г. по Постановлению Правительства РФ N1312 «О внесении изменений в требования к осветительным устройствам и электрическим лампам, используемым в цепях переменного тока в целях освещения».

Одним из положений Постановления является пункт 27, который гласит: «Пусковой ток светильников на этапе 2 не должен быть более 5-кратного рабочего тока источника питания» (пункт введён Постановлением Правительства РФ от 3 ноября 2018 г. N1312). Именно этот пункт вызвал ожесточённую дискуссию в светотехническом сообществе в течение последующего полугодия.

Не требует доказательств, что пусковой ток – одна из характеристик, влияющих на потребительские свойства ОП, определяя требования к системам энергоснабжения и безопасности при эксплуатации ОУ. Однако, формулировка требований к ограничению пускового тока по пункту 27, такова, что приводит к невозможности применения данного требования на практике по нескольким объективным причинам, а именно:

- в настоящее время отсутствуют стандартизированное описание понятия пускового тока ОП и аттестованная методика определения его значения;

- в пункте 27 говорится об ограничении пускового тока ОП, но на практике импульсы пускового тока имеют сложную конфигурацию и при отсутствии чёткого определения не ясно, какое амплитудное значение должно выбираться за опорное для сравнения с номинальным значением;

- в требовании по пункту 27 никак не оговаривается длительность импульса пускового тока. Однако для электротехнического проектирования сетей электроснабжения ОУ именно сочетание амплитуды и длительности определяет энергетику, исходя из которой должен осуществляться выбор защитных коммутационных устройств;

- обозначенные требования к учёту характеристик пускового тока не рассматривают групповое включение ОП, которое чаще и реализуется на практике. В этом случае наблюдается сложение импульсов пусковых токов при включении ОУ;

- формулировка пункта 27 вводит недопустимо двойное толкование. С одной стороны, оговаривается пусковой ток ОП, а с другой, этот ток ограничивается 5-кратным током источника питания. Это приводит к двум последствиям:

- толкование уровня ограничения теряет конкретность и становится неоднозначным, т.к. в настоящее время существует большой ассортимент ОП с СД, в которых применяется не один источник питания, а несколько;

- не учитывается, что параметры нагрузки, которая может варьироваться в ОП с СД с одним и тем же источником питания, с одной стороны, определяют пусковой ток, а с другой, – рабочий ток источника питания, от которого должен отсчитываться предел пускового тока. При этом тол-

кование уровня ограничения, аналогично предыдущему случаю, теряет конкретность и становится неоднозначным.

Данные факты уже обозначены рядом авторов, которые в своих публикациях подробно рассмотрели соответствующие возможные последствия текущей формулировки пункта 27 Постановления как с технической, так и с социально-экономической точек зрения [1, 2].

Не желая углубляться в причины становления текущей ситуации, авторы считают единственно правильным выходом создание методики измерения переходных процессов в момент включения ОП и утверждение характеристик импульса пускового тока для дальнейшего применения в регламентирующей документации. Описанию этой методики и посвящена данная статья.

## 1. Методика определения электрических характеристик ОП со светодиодными источниками света во время включения (пуска)

Предлагаемая методика основана на положениях, впервые предложенных Ассоциацией производителей светодиодов и систем на их основе (АПСС) и описанных в п. 9.7 её стандарта СТО.69159079–02–2018, и на момент написания данной статьи уже опробована несколькими компаниями, входящими в АПСС.

В первую очередь, данная методика предназначена для единообразного определения параметров пускового тока и внесения их в эксплуатационную документацию ОП (и, естественно, информирования потребителя). Во вторую очередь, она служит основой формирования объективных требований к параметрам пусковых токов, согласно статистическим данным по испытаниям, и включения полученных так результатов в соответствующие нормативно-правовые акты.

Кроме того, данная методика позволит уже сейчас в технической документации предоставлять потребителям для правильной оценки пусковых характеристик ОУ и подбора устройств защиты и управления следующее:

- величину интеграла Джоуля;
- максимальную высоту пускового импульса и его длительность;

– рекомендации по допустимому максимальному количеству ОП на один автомат защиты самого распространённого типа – например, типа С16.

### 1.1. Терминология и обозначения

Для дальнейшего описания введём следующую терминологию и обозначения используемых величин:

**пусковой ток**  $I_t$  – мгновенное максимальное значение импульса тока ОП возникающего при включении, А;

**длительность пускового тока**  $\Delta t$  – длительность импульса пускового тока, измеренная на уровне половины амплитудного значения, мкс;

**время**  $t$ , мс;

**условная величина пускового тока**  $I_r$  – приведённое значение импульса пускового тока длительностью менее 2 мс, определённое с учётом поправочного «коэффициента *ABB*» в зависимости от длительности импульса;

**поправочный «коэффициент *ABB*»**  $K$  – коэффициент, позволяющий корректировать амплитудное значение сверхкоротких импульсов пускового тока (менее 2 мс) для их интерпретации при оценке воздействия на предохранители, автоматические выключатели и др.;

**интеграл Джоуля**  $E_1 = \int_{t_0}^{t_1} i^2 dt$  – условная величина, характеризующая тепловое действие тока на рассматриваемый элемент электроустановки, численно равная интегралу от квадрата значения тока по времени, в пределах длительности импульса.

### 1.2. Переходные процессы в момент включения и пропускная способность устройств защиты

Отправной точкой в построении методики служит то, что во время включения ОП с СД источниками света

в его электрической схеме идут следующие переходные процессы:

– зарядка емкостных элементов устройства управления (УУ) при подаче напряжения (длительность менее 2 мс);

– запуск схемы УУ (десятки мс);

– время выхода тока СД источника на рабочий режим (до 1,5 с).

Таким образом, при включении ОП может происходить серия импульсов разной длительности и амплитуды. Эти процессы обуславливают кратковременное многократное увеличение входного тока [3].

Параметры пускового процесса ОП (особенно при групповом включении ОП) определяют требования к системам электроснабжения, управления, учёта электропотребления, защиты и др. На практике требуется количественное описание пускового процесса в формате, удобном для использования потребителем. А именно, чтобы определять, сработают или не сработают предохранитель, автомат защиты и др. при возникновении заданного числа таких токовых импульсов [4, 5].

Уровень пропускной способности автоматического выключателя, защищающего сеть от перегрузки, определяется как максимальным амплитудным значением тока (электромагнитная составляющая), так и произведением значений квадрата пускового тока на время его длительности (тепловая составляющая) [6, 7]. Именно эти характеристики: амплитудный ток, его длительность и форма пускового импульса должны определяться для обоснованного выбора предохранителей, автоматических выключателей и др.

На значение пускового тока влияет момент включения ОП, соответствующий фазе изменения напряжения сети питания. Пусковой ток для нагрузок емкостного типа будет максимален в случае включения на максимуме напряжения и минимален при

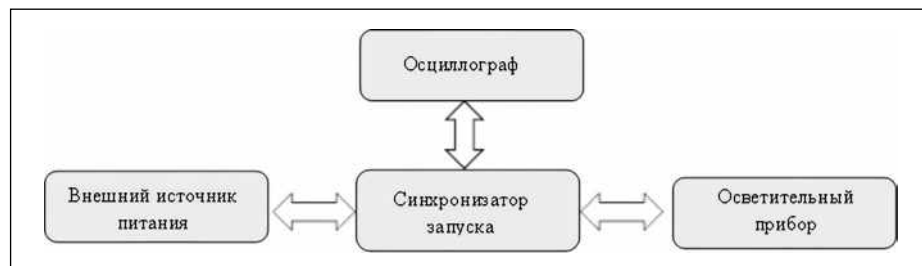


Рис. 1. Структурная схема измерительной установки

включении в зоне перехода через нулевое значение.

### 1.3. Условия проведения измерений

Измерения проводят при нормальных климатических условиях последовательно по одному образцу ОП, последовательность выбирают произвольно. Каждое измерение или последовательность соответствующих измерений выполняют с одним рядом условий в пределах заданной для оборудования рабочей обстановки и при номинальном напряжении электропитания, если иные требования не установлены в основополагающих стандартах. В течение испытаний следует проводить мониторинг испытательного напряжения с погрешностью менее 2%. Отклонения напряжения не должны превышать 2%. При этом испытания следует проводить на образцах ОП, не подключаемых к электросети в течение минимум 1 ч. За это время происходит полная разрядка емкостных элементов схемы ОП. Для обеспечения точности измерений рекомендуется проводить их на трёх образцах ОП одной модели/артикула.

### 1.4. Состав и требования к испытательному оборудованию

1.4.1. Для измерения рекомендуется использоваться гальванически развязанный осциллограф с памятью, который может фиксировать величины  $di/dt$  с погрешностью не более 10 А/мкс.

1.4.2. При измерении тока должно использоваться разрешение по шкале времени, позволяющее измерять ширину импульса при разных значениях тока, в том числе на уровне половины амплитудного значения.

1.4.3. Измерение характеристик импульса пускового тока должно производиться при включении ОП в момент, соответствующий максимальному значению напряжения питания. Для синхронизации начала измерений с моментом включения ОП следует применять специальное устройство «синхронизатор запуска» – по сути, управляемый коммутационный элемент измерительной установки, рассмотренный ниже, в п. 2.

1.4.4. В ходе испытаний должно проводиться не менее 3 повторных измерений, что гарантирует регистрацию максимальных значений харак-

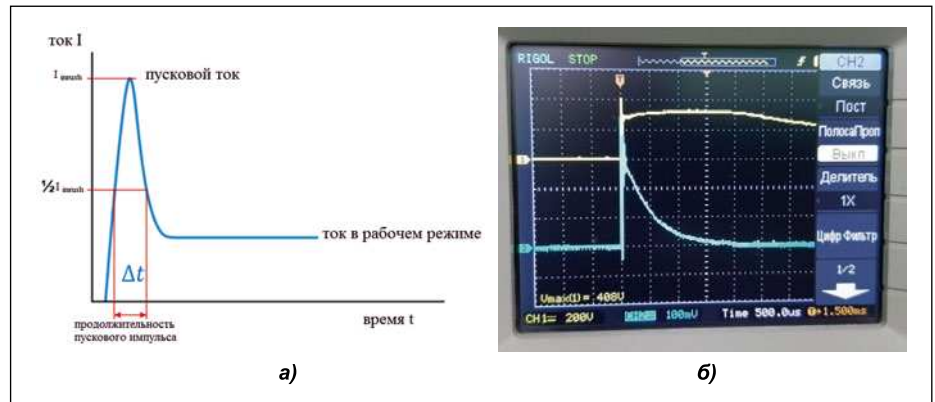


Рис. 2. Импульс пускового тока: а – схематическое представление; б – вид при измерениях

теристик пускового тока. Между повторными измерениями одного образца ОП должно проходить не менее 1 ч, и во время паузы он должен отсоединяться от питающей электросети.

### 1.5. Структурная схема установки для проведения испытаний и порядок испытаний

Измерения проводятся на установке, структурная схема которой приведена на рис. 1.

Порядок испытаний подразумевает последовательное проведение следующих процедур:

- проверка лабораторных условий;
- проверка правильности функционирования оборудования;
- проведение испытаний;
- оценка результатов испытаний.

#### 1.5.1. Проверка лабораторных условий

Измерения проводятся при нормальных климатических условиях с учётом рекомендаций производителя ОП, приведённых в сопроводительной документации.

Электромагнитные условия в лаборатории должны быть такими, чтобы гарантировать правильное функционирование ОП, измерительных приборов и отсутствие влияния на результаты испытаний.

#### 1.5.2. Проверка правильности функционирования оборудования

Испытательная установка подключается к источнику питания. В качестве источника питания может использоваться стандартная питающая сеть переменного тока напряжением 230 В со

значением внутреннего сопротивления (петли фаза-ноль) не более 0,75 Ом.

Проводится настройка параметров осциллографа в режиме ждущей развёртки с синхронизацией по каналу с блоком «синхронизатор запуска».

ОП подключается к блоку «синхронизатор запуска».

#### 1.5.3. Проведение испытаний

После включения блока «синхронизатор запуска» включение ОП производится автоматически в момент максимального напряжения питающей сети переменного тока. При этом синхронно запускается развёртка осциллографа.

В ходе испытаний на дисплее осциллографа измеряются амплитудные значения пускового тока  $I_t$  (А) и его длительность на уровне половины амплитуды для каждого образца. Упрощённый (схематический) и реальный виды пускового тока представлены на рис. 2, а и б соответственно.

#### 1.5.4. Оценка результатов испытаний

На основании полученных результатов рассчитывается параметр, характеризующий тепловое воздействие на предохранитель или энергетику импульса пускового тока – интеграл Джоуля  $E_1$  (А<sup>2</sup>·с).

Для наиболее характерного случая формы импульса пускового тока для светильников с СД (рис. 2) интеграл Джоуля можно представить как  $E_1 = I_t^2 \cdot \Delta t$ .

Для импульса произвольной формы требуется провести интегрирование значения квадрата тока по длительности импульса по полученным в результате испытаний данным. На

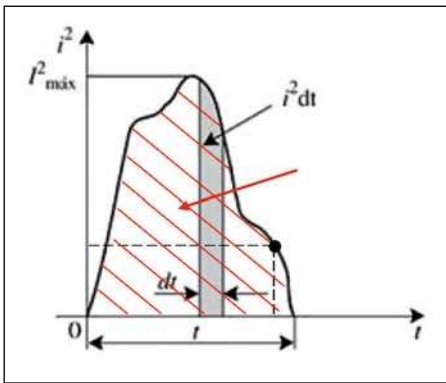


Рис. 3. Графическое представление определения интеграла Джоуля

рис. 3 показан принцип определения интеграла Джоуля, где  $E_I$ , оценивается как площадь под кривой, огибающей траекторию мгновенных значений квадрата импульсного тока.

В случае появления при включении ОП нескольких импульсов тока этот результат должен объясняться сложением значений  $E_I$  для каждого импульса.

Если ширина импульса оказывается менее 2 мс, то для интерпретации его электромагнитного воздействия определяется  $I_T$ .

Для оценки  $I_T$  применяется нормирование с учётом поправочного «коэффициента АВВ»  $K$  в соответствии с графиком, представленным на рис. 4, и учётом фактора срабатывания автоматов защиты  $N$ , характеризующего их электромагнитную чувствительность. В нашем случае для оценки максимального влияния электромагнитной составляющей импульса пускового

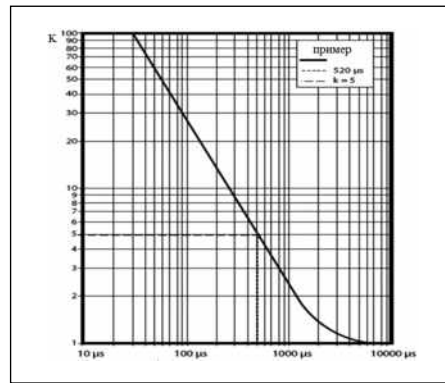


Рис. 4. Зависимость поправочного «коэффициента АВВ»  $K$  от длительности импульса тока [8] (для определения мгновенных значений тока срабатывания автоматического выключателя при малых длительностях импульса тока)

тока будем использовать минимальное значение фактора срабатывания для автомата типа «В» ( $N = 3$ ) [8].

Для этого по результатам испытаний устанавливается значение длительности импульса, для которого по рис. 4 определяется значение  $K$ . Например, при длительности импульса 500 мкс, согласно рис. 4,  $K = 5$ . Учитывая, что  $I_T$  определяется как  $I_T = I_T / (K \cdot N)$ , то, например, при измеренном значении  $I_T = 40$  А и указанных выше значениях  $K$  и  $N$  значение  $I_T$  составит 2,7 А.

В случае кратковременных импульсов (короче 100 мкс) для интерпретации воздействия пусковых характеристик ОП на предохранители следует использовать  $I_T$ .

Так как источник питания ОП является сложным устройством, содер-

жащим несколько элементов с реактивным сопротивлением, то возможно наличие нескольких импульсов со значительными амплитудами, но разной длительности. Поэтому в случае появления при включении ОП не менее двух импульсов тока длительностью менее 2000 мкс, разнесённых во времени, для расчёта выбирается импульс, больший по величине.

В случае, если импульс пускового тока имеет комбинированную структуру: кратковременный импульс (короче 100 мкс) — электромагнитное воздействие — и более длительный импульс — тепловое воздействие, то следует определять и  $I_T$  (А) и  $E_I$  ( $A^2 \cdot c$ ). В качестве примера, на рис. 5 рассмотрен такой пусковой импульс УУ для ОП с СД,

По действию на предохранитель или автомат защиты, начальный кратковременный импульс длительностью менее 80 мкс и амплитудой  $I_T = 120$  А может рассматриваться только как электромагнитное воздействие. В этом случае, для определения  $I_T$  воспользуемся рис. 4 и определим  $K$ . При длительности импульса 40 мкс и  $N = 3$  искомый  $K = 70$ . И соответственно,  $I_T = 120 / (70 \cdot 3) \approx 0,6$  А.

За кратковременным импульсом следует основной импульс традиционной формы с максимальным мгновенным значением  $I_T = 53,5$  А и длительностью 760 мкс, и соответственно, для этой части импульса  $E_I \approx 53,5^2 \cdot 0,00076 / 2 A^2 \cdot c$  (считая здесь  $\Delta t \approx 760 / 2$  мкс).

На основании полученных характеристик пускового импульса тока, возникающего при включении ОП с СД — амплитудное значение тока, длительность и форма импульса — можно определить требуемые характеристики предохранителей или автоматических выключателей. В нашем случае это:

- $I^2t$ -кривая, дающая максимальное значение  $I^2t$  как функцию ожидаемого тока в заданных условиях эксплуатации;
- ток мгновенного расцепления — минимальное значение тока, вызывающее автоматическое срабатывание выключателя без преднамеренной выдержки времени.

## 1.6. Показатели точности измерений

Как показали испытания, проведённые по данной методике в несколь-

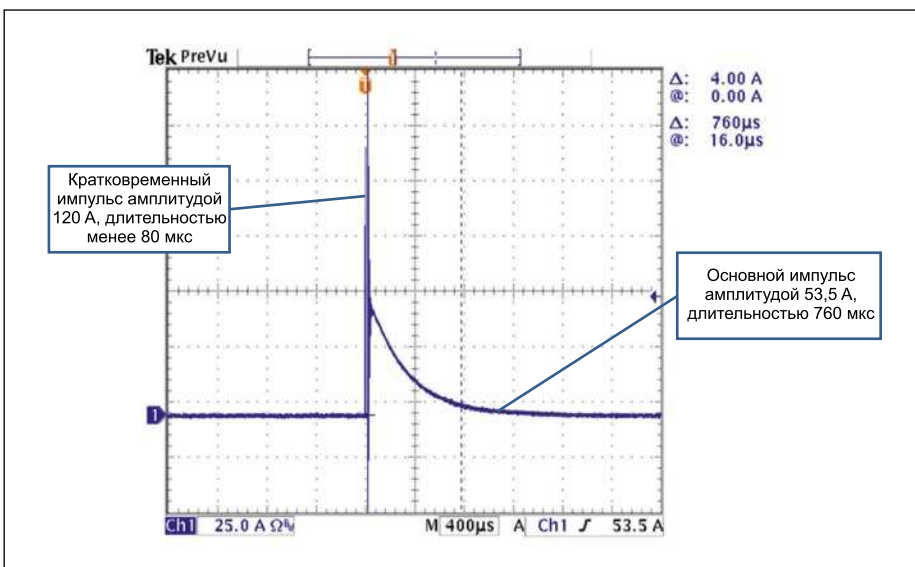


Рис. 5. Осциллограмма мгновенных значений пускового тока устройства управления («драйвера») светильника с СД с комбинированной структурой импульса [8]

ких компаниях-членах АПСС, погрешность измерений пускового тока и длительности его импульса должна находиться в пределах  $\pm 10\%$  с доверительной вероятностью 0,9.

## 2. Блок «синхронизатор запуска»

Очевидно, что пусковые характеристики ОП, при прочих равных условиях, определяются моментом включения ОП относительно меняющегося с частотой 50 Гц мгновенного значения напряжения питающей электрической сети 230 В. Соответственно, если включение происходит вблизи максимума напряжения, то переходные процессы будут наиболее интенсивны и пусковой ток максимален. Если же включение происходит в зоне перехода напряжения через ноль, то переходные процессы будут минимальны и пусковой ток минимален. На рис. 6 демонстрируется существенная разница амплитуд пусковых токов для включения на максимуме напряжения (а) и в зоне перехода через 0 (б).

Следовательно, при испытаниях ОП, в том числе с отложенным пуском, и измерении параметров пускового тока необходимо исследовать наиболее критичный вариант включения – включение в момент максимальных значений напряжения питания. Кроме того, строгая фиксация момента включения позволит минимизировать погрешности измерений и обеспечивать воспроизводимость результатов.

Во исполнение данного требования при измерениях по описываемой методике используется специальное устройство «синхронизатор запуска», выполненное в виде автономного блока (рис. 7) и включённое в состав установки для проведения испытаний (рис. 1 и 8).

Основная роль синхронизатора запуска – обеспечение подачи напряжения питания на ОП в момент максимума этого напряжения и запуск развёртки осциллографа в момент, обеспечивающий фиксацию изменения пускового тока ОП. При этом внутри блока расположен калиброванный шунт, обеспечивающий точную фиксацию мгновенных значений пускового тока осциллографом.

Основные характеристики блока «синхронизатора запуска» приведены в таблице.

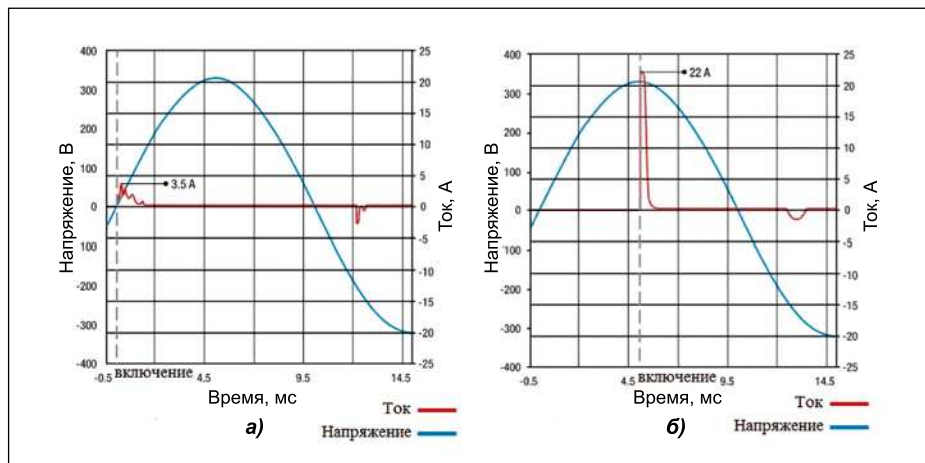


Рис. 6. Различие амплитудных значений пусковых токов в зависимости от момента включения

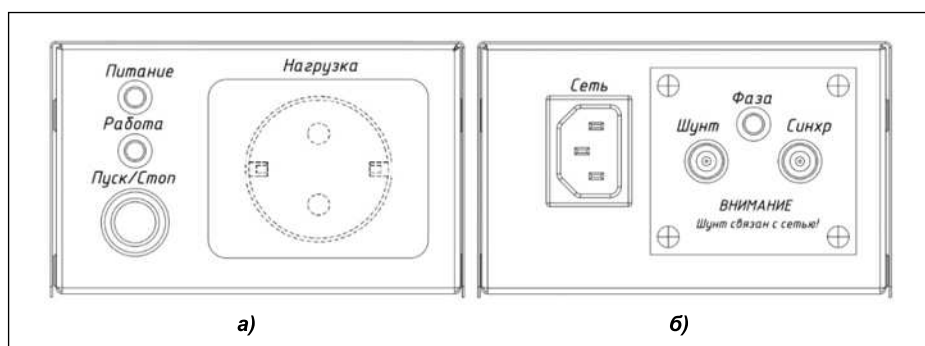


Рис. 7. Внешний вид синхронизатора запуска (СЗ): а – передняя панель; б – задняя панель

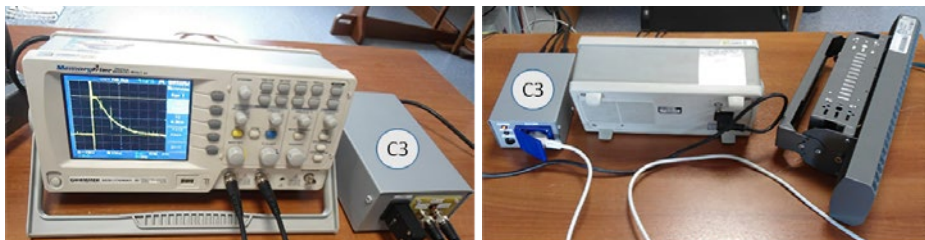


Рис. 8. Синхронизатор запуска (СЗ) в составе установки для проведения испытаний пускового тока

## 3. Заключение

Описанная в статье методика – «методика определения электрических характеристик ОП с СД источниками света во время включения (пуска)» – при условии её аттестации и включения в перечень рекомендованных к использованию позволит определять необходимые параметры импульсов пускового тока ОП, достаточные для рационального проектирования систем электроснабжения ОУ. Тем самым снимется существующая неопределённость в вопросе измерения пусковых токов ОП.

Кроме того, данная методика позволит, соблюдая единообразие, сформировать статистику по реальным значе-

ниям пусковых токов в системах электропитания ОУ на реальных объектах и затем на её основе установить критерии качества для уровней пусковых токов отдельных ОП. Развитием данной методики служит создание установки измерений амплитуды и длительности пускового тока ОП не от сети питания, характеристики которой могут зависеть от многих факторов, а от источника постоянного тока с буферным накопительным конденсатором. Это позволит измерять параметры пускового тока в широком диапазоне напряжений при улучшении повторяемости результатов.

От лица нашей компании и всех компаний, входящий в состав АПСС, авторы призывают всех участников

## Основные характеристики блока «синхронизатор запуска»

| Параметр   | Значение      |
|--|---------------|
| Диапазон напряжения питания (перем. тока), В                                   | 100–264       |
| Максимальный длительный ток, А   | 10            |
| Максимальный пиковый ток длительностью 20мс, А                                 | 400           |
| Критическая скорость нарастания тока без учёта параметров сети, А/мкс          | 50            |
| Внутреннее падение напряжения при токах в нагрузке                             |               |
| 10А, В   | 1,25          |
| 50А, В   | 1,85          |
| 100А, В  | 2,6           |
| 200А, В  | 4,2           |
| 400А, В  | 7,25          |
| Сопrotивление внутреннего измерительного шунта, Ом                             | 0,0075        |
| Класс точности шунта   | 0,5           |
| Тип шунта  | 75ШСМ3–10–0,5 |
| Фазовый угол подачи напряжения питания в нагрузку от точки пересечения нуля, ° | 85–90         |
| Ток утечки сеть-нагрузка при напряжении питания 265В в режиме «Стоп», мА       | 0,8–1         |
| Амплитуда импульса на разъёме «Синхр», В                                       | 5             |

рынка и профильные федеральные органы исполнительной власти поддерживать изложенный здесь подход и способствовать ускорению аттестации описанной методики с целью скорейшего превращения её в полноценную узаконенную методику измерения.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Сибриков А.В., Киричек А.И. Применение светодиодов для освещения г. Москвы. Проблемы эксплуатации // Светотехника. – 2017. – № 1. – С. 28–31.

2. Абрамов А.В., Богданов А.А., Данилко А.В., Дмитриев П.Б., Карев А.В., Степанов А.В. Электрические характеристики ОП со светодиодными источниками света при включении и требования к устройствам защиты сети электропитания // Полупроводниковая светотехника. – 2020. – № 2. – С. 28–31.

3. Impact of LED Lighting on Electrical Networks / EN // White Paper// 998–2095–10–07–17AR0\_EN. URL: [https://download.schneider-electric.com/files?p\\_Doc\\_Ref=998–2095–10–15–14AR0\\_EN](https://download.schneider-electric.com/files?p_Doc_Ref=998–2095–10–15–14AR0_EN) (дата обращения: 12.05.2020).

4. ANSI C82.16–2015 American National Standard for Light-Emitting Diode Drivers – Methods of Measurement.

5. ГОСТ ИЕС61009–1–2014 «Выключатели автоматические, срабатывающие от оста-

точного тока, со встроенной защитой от тока перегрузки, бытовые и аналогичного назначения. Часть 1. Общие правила».

6. ГОСТ ИЕС60269–1–2016 «Предохранители плавкие низковольтные. Часть 1. Общие требования».

7. IEC60898–1:2015/AMD1:2019 Amendment 1 – Electrical accessories – Circuit-breakers for overcurrent protection for household and similar installations – Part 1: Circuit-breakers for a.c. operation.

8. An overview of circuit breakers, LED Driver input and inrush current, and how to load a circuit breaker with Inventronics LED Drivers. / Inventronics Circuit Breakers. URL: <https://www.inventronics-co.com/wp-content/uploads/2018/04/Circuit-Breaker-App-Note.pdf> (дата обращения: 12.05.2020).



**Абрамов Анатолий Вячеславович**, инженер. Окончил в 2013 г. Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники (ТУСУР) по специальности «Промышленная электроника».

Инженер-конструктор ООО МГК «Световые Технологии». Область научных интересов: схемотехника, электроника, светотехника



**Богданов Александр Александрович**, кандидат техн. наук. Окончил в 1997 г. Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им.

В.И. Ульянова (Ленина) по специальности «Микроэлектроника». Руководитель отдела нормативно-технического регулирования ООО «МГК «Световые Технологии». Член правления АПСС. Сфера научных интересов: микроэлектроника, оптоэлектроника, светотехника



**Данилко Андрей Владимирович**, инженер. Окончил в 1993 г. Кыргызский технический университет по специальности «Радиоэлектронная аппаратура». Руководитель Центральной заводской лаборатории ООО «МГК «Световые Технологии».

Область научных интересов: испытание РЭА



**Дмитриев Пётр Борисович**, инженер. Окончил в 1995 г. МЭИ. Руководитель технического отдела ООО «МГК «Световые Технологии». Область научных интересов: стандартизация, программирование



**Карев Александр Владимирович**, кандидат техн. наук. Окончил в 1983 г. МЭИ. Технический директор ООО «МГК «Световые Технологии». Область научных интересов: светотехника



**Степанов Андрей Владимирович**, инженер. Окончил в 2007 г. Рязанский государственный радиотехнический университет, кафедры «Радиотехнические системы». Руководитель бюро

электронных систем ООО «МГК «Световые Технологии». Область научных интересов: схемотехника, светотехника, микроэлектроника



# Внутреннее освещение исторического здания с помощью светодиодных технологий на примере мечети Фейт Паша

С. Б. ЭФЕ<sup>1</sup>, Д. ВАРХАН<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Кафедра электротехники, университет Бандырма Онъеди Эйлюль, Турция

<sup>2</sup> Главное управление фондов, управление поселением Диярбакыра, Турция

E-mail: sefe@bandirma.edu.tr

## Аннотация

В этой работе представлено исследование освещения места поклонения культа в соответствии со стандартами МКО. В существующей осветительной установке использовались галогенные лампы накаливания. В исследовании было проведено сравнение по уровню освещённости и материальным затратам двух смоделированных осветительных установок на основе традиционных источников света и на основе светодиодных технологий. Согласно нормативным требованиям МКО уровень освещённости должен составлять 100 лк или выше для мест поклонения культа. Осветительная установка на основе светодиодов при выполнении нормируемых показателей освещённости показала большую эффективность (на 85 %) по сравнению с установкой с галогенными лампами накаливания.

**Ключевые слова:** энергоэффективность, светодиоды, историческое место, искусственное освещение, освещённость.

## 1. Введение

Освещённость, которая физически определяется как световой поток, падающий на единицу площади, также выражается как уровень воспринимаемости окружающей среды или как результат практического использования света. Существует два вида освещения: естественное (солнечное) и искусственное. [1–2].

Характер освещения естественным светом меняется ежечасно, ежесезонно и будет меняться в зависимости от погодных условий. Поскольку обеспечить необходимый уровень освещённости естественным освещением в любое время в тех местах, где освещение необходимо все время, невозможно, то используется искусственное освещение [3–5]. Качественная

и правильно спроектированная осветительная установка повышает эффективность работы и экономические показатели, предотвращает несчастные случаи, искажение зрения, улучшает восприятие глазом пространства и повышает уровень комфорта жизни. Конструкция освещаемого пространства и причина потребности в освещении определяют критерии осветительной установки.

Характеристики освещаемой территории влияют на критерии выбора осветительного прибора, который позволит создать качественное освещение и при этом подчеркнуть эстетический образ архитектурного здания. Эти характеристики следует рассматривать с точки зрения понятий, связанных с комфортом, таких как блёскость, цвет и температура освещения [6–8].

Это исследование посвящено освещению исторической мечети, расположенной в Диярбакыре, Турция. Эта тема была выбрана потому, что было проведено слишком мало исследований как по освещению, так и по модернизации систем освещения исторических зданий [9]. В рамках работы исследуются принципы светотехнического проектирования исторических зданий и преимущества использования светодиодного освещения в таких местах с точки зрения энергосбережения. В предлагаемом исследовании современные и маломощные светодиодные светильники были адаптированы и использованы вместо неэффективных осветительных приборов в историческом здании. Таким образом, при достижении уровня освещённости в соответствии со требованиями МКО одновременно была достигнута экономия энергии. На этапах проектирования и монтажа осветительных приборов изначальный облик здания не был нарушен.

Проект освещения, реализованный в этом исследовании, был проанализирован в соответствии со стандартами

Международной комиссии по освещению (МКО). С этой целью применение освещения в проекте сравнивалось с некоммерческой программой моделирования [13].

## 2. Светодиодное освещение

Потребление энергии на освещение увеличивается день ото дня. Из-за неосознанного использования энергетических ресурсов, отсутствия достаточной технической инфраструктуры для достижения возобновляемых источников энергии и высоких объёмов энергии значимость экономии в освещении значительно возросла [10–12].

Ранее для того, чтобы обеспечить энергоэффективность в условиях защиты здоровья и комфорта пользователей, использовались люминесцентные лампы вместо ламп накаливания в новых проектах, но постепенно с появлением светодиодных источников света они стали терять свою привлекательность, и предпочтение стало отдаваться в сторону последних. Светоизлучающие диоды (светодиоды), новейшая технология, используемая в искусственном освещении, считаются самым важным изобретением в истории освещения после электрической лампы, которую Эдисон открыл столетия назад [14, 16].

Благодаря разработкам в области полупроводниковых технологий стали доступны осветительные приборы с высокой эффективностью и цветовым разнообразием. Светодиоды также являются продуктом этой разработки. Например, вместо лампы накаливания мощностью 60 Вт можно использовать светодиодную матрицу мощностью 9 Вт для снижения энергопотребления на 80–85 % [17–22]. Поскольку светодиоды могут использоваться как единственный источник света, так и объединяться в светодиодные осветительные системы, обеспечивающие повышение энергоэффективности освещения, они должны оцениваться иначе, чем традиционные источники света. Например, светодиодные лампы могут использоваться со всеми видами программно-обеспеченного и связи [23–26].

## 3. Освещение места поклонения культа

Экспозиция исторических мест в надлежащем и достойном виде

Рис. 1. Изображение мечети (а) и пронумерованные зоны освещения (б) [28, 29]



приобрела большое значение, и в последние несколько лет для этих целей было использовано много новых и различных методов. Правильное освещение – наилучший способ подчеркнуть эти качества. Основная цель освещения – обеспечить отличную видимость при низком энергопотреблении. Кроме того, жизненно важно не навредить историческим зданиям и их выдающимся особенностям. В данной статье обсуждается освещение исторического здания. В качестве объекта исследования была выбрана древняя мечеть. Во-первых, с учётом критериев уровня освещённости помещений, определённых стандартами, и с использованием оригинальных архитектурных планов были определены площади, подлежащие освещению в этом историческом здании. Затем выделенные участки были освещены, не нанося ущерба историческому месту с ориентацией на визуальные качества восприятия. Рекомендованная осветительная установка была реализована экспериментально, а для определения наиболее достоверных результатов проводился анализ также с точки зрения экологических и архитектурных аспектов. Было проведено сравнение годового энергопотребления существующей и рекомендованной осветительных установок по данным энерготарифов.

В целом, основными задачами светотехнического проектирования исторического здания должны быть:

- основные архитектурные элементы, орнаменты, ценные элементы зарегистрированного культурного наследия должны быть совместимы с оригинальной текстурой таким образом, чтобы подчеркнуть социальную и историческую значимость, а также ценность в данный момент времени

Рис. 2. Результаты измерения освещённости при естественном освещении внутри мечети

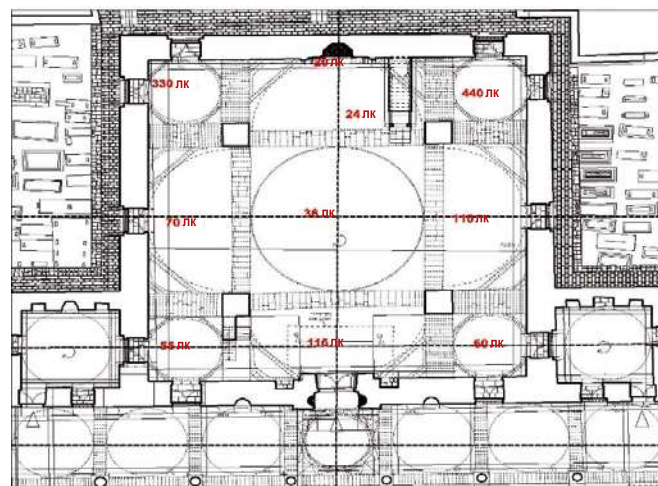
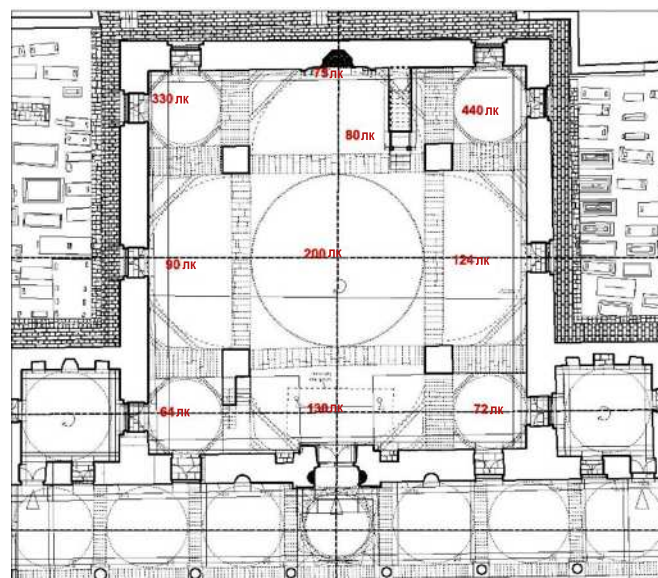


Рис. 3. Результаты измерения освещённости при естественном освещении и искусственном освещении от центральной люстры



и описание наряду с оригинальной композицией этого объекта,

- сделать возможным квалифицированное наблюдение и восприятие местности,
- обеспечить безопасность проведения работ, особенно в старых районах городов, повысить уровень комфорта пребывания, осмотра досто-

примечательностей и передвижения в ночное время,

- разработать подход, соответствующий принципам реставрации помимо эстетики,
- минимизация воздействия на окружающую среду и максимизация экономии энергии при достижении желаемого уровня освещённости [27].

Таблица 1

Значения измеренной освещённости по зонам освещения

| Номер зоны освещения | Естественное освещение, лк | Естественное освещение и центральная люстра, лк | Искусственное освещение, лк |
|----------------------|----------------------------|---|-----------------------------|
| 1                    | 20                         | 75  | 90                          |
| 2                    | 330                        | 330   | 100                         |
| 3                    | 24                         | 80  | 100                         |
| 4                    | 440                        | 440   | 98                          |
| 5                    | 70                         | 90  | 110                         |
| 6                    | 36                         | 200   | 220                         |
| 7                    | 110                        | 124   | 110                         |
| 8                    | 55                         | 64  | 98                          |
| 9                    | 116                        | 130   | 84                          |
| 10                   | 60                         | 72  | 96                          |

Освещение мечети Фатиха Паша, построенной в Диярбакыре в 1516 – 1520 гг., выбранной в качестве примера, было выполнено в соответствии с вышеописанными задачами. Место поклонения культа и пронумерованные зоны освещения показаны на рис. 1.

В этом исследовании есть как внутреннее, так и наружное освещение. В то время как наружное освещение предназначено только для визуального восприятия, это исследование было сосредоточено на освещении внутри помещения, которое должно соответствовать стандартам. Минимальный уровень освещённости помещений для богослужений определяется на уровне 100 лк в соответствии с стандартом МКО (*CIE Lighting of Indoor Work Places CIE S008 / E-2001*) [13].

В мечети Фейт Паша, в светлое время суток, уровень освещённости измеряется в отсутствие искусственного освещения, как показано на рис. 2. Видно, что уровень освещённости в некоторых зонах очень высок только при естественном освещении, а в некоторых – значительно ниже желаемого.

На рис. 3 представлены результаты измерения освещённости от центральной люстры с выключенными остальными источниками света. Отметим, что в течение дня для обеспечения требуемого уровня освещённости достаточно, чтобы была включена одна центральная люстра. На рис. 4 представлены результаты измерения освещённости в ночное время при искусственном освещении. Внутренний вид мечети после завершения монтажа приведён на рис. 5. В табл. 1 приведены значения освещённости, измеренные с помощью люксметра, в соответствии с зонами разбиения.

Лампы, которые активно работают днём или ночью, – это лампы в зоне 6. Согласно табл. 1 в ходе физических измерений в зоне 6 было получено значение 36 лк при высоте 5 м при естественном освещении. В течение дня, в центральной части (зона 6) при естественном освещении и включённой центральной люстре измеренное значение освещённости составило 200 лк. А в ночное время при искусственном освещении в этой зоне значение составило 220 лк. Соответственно, значение 36 лк не соответствует регламентируемым значениям МКО в условиях отсутствия дневного света [1, 3, 30, 31].

Рис. 4. Результаты измерения освещённости от искусственного освещения в ночное время

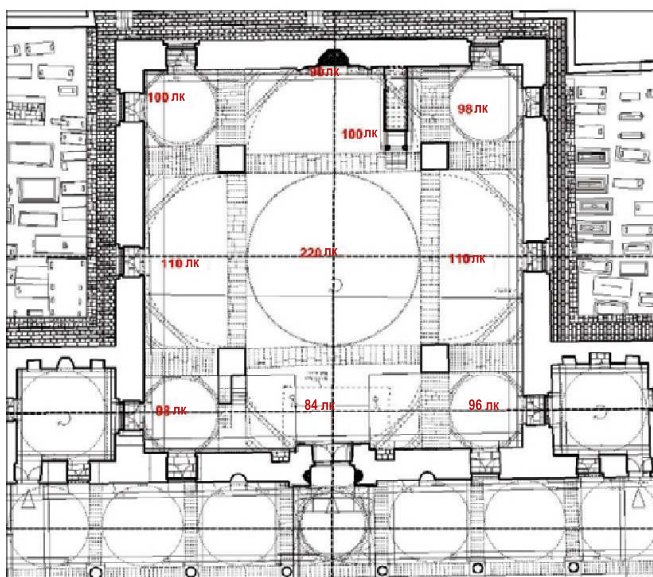
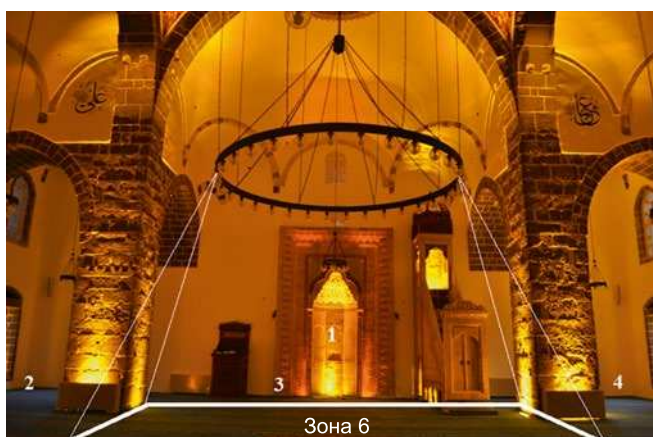


Рис. 5. Изображение мечети после установки встроенных светодиодных прожекторов



**Расчётные значения освещённости в центральной зоне после замены галогенных ламп накаливания на светодиодные**

| $E_{\min}=18,56$ лк $E_{\max}=399,94$ лк $E_{\text{средняя}}=118,29$ лк |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |
|---|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| м/м   | 0,700  | 2,100  | 3,500  | 4,900  | 6,300  | 7,700  | 9,100  | 10,500 | 11,900 | 13,300 |
| 0,583   | 15,64  | 14,01  | 9,53   | 13,36  | 13,97  | 13,98  | 13,37  | 9,55   | 14,04  | 15,68  |
| 1,750   | 28,58  | 26,98  | 16,73  | 21,69  | 21,71  | 21,72  | 21,71  | 16,762 | 27,01  | 28,63  |
| 2,917   | 49,13  | 45,99  | 32,44  | 30,56  | 27,27  | 27,27  | 30,57  | 32,47  | 46,02  | 49,18  |
| 4,083   | 87,07  | 68,99  | 62,92  | 41,08  | 37,43  | 37,44  | 41,09  | 62,95  | 69,03  | 87,12  |
| 5,250   | 164,72 | 140,28 | 98,89  | 60,55  | 57,53  | 57,54  | 60,57  | 98,92  | 140,32 | 164,78 |
| 6,417   | 235,46 | 283,84 | 183,06 | 98,47  | 82,22  | 82,22  | 98,49  | 183,09 | 283,88 | 235,52 |
| 7,583   | 359,26 | 406,25 | 262,06 | 144,49 | 111,32 | 111,33 | 144,51 | 262,09 | 406,29 | 359,32 |
| 8,750   | 284,76 | 291,16 | 195,53 | 122,71 | 101,25 | 101,25 | 122,73 | 195,56 | 291,20 | 284,83 |
| 9,917   | 158,65 | 129,60 | 94,322 | 65,659 | 62,80  | 62,81  | 65,67  | 94,35  | 129,64 | 158,71 |
| 11,083  | 77,78  | 58,14  | 47,34  | 36,26  | 37,84  | 37,85  | 36,27  | 47,37  | 58,19  | 77,84  |
| 12,250  | 43,69  | 36,81  | 30,76  | 24,97  | 24,826 | 24,83  | 24,99  | 30,79  | 36,85  | 43,74  |
| 13,417  | 29,25  | 24,81  | 21,80  | 18,71  | 17,335 | 17,34  | 18,72  | 21,82  | 24,84  | 29,30  |

Потому что в соответствующем стандарте МКО для мест поклонения культуре требуется освещённость не менее 100 лк [13]. При анализе энергопотребления существующей осветительной установки, видно, что в зоне б происходит высокое потребление мощности из-за использования 32 галогенных ламп накаливания по 60 Вт каждой. Была смоделирована осветительная установка, в которой 60 Вт лампы накаливания в центральной зоне (зона б) были заменены на светодиодные лампы 9 Вт нейтрального белого света при условии эквивалентного светового потока. Для существующей и смоделированной осветительных установок было проведено сравнение по энергопотреблению и полученному уровню освещённости.

Для расчёта и моделирования использовалось некоммерческое программное обеспечение. Область для анализа распределения освещённости делится на равные части. Расчётная поверхность в зоне б размером 12×12 м. Высота подвеса источников света составляет 5 м. Коэффициент обслуживания принимается равным 0,92. Значения освещённости, пред-

Таблица 3

**Расчёт энергопотребления существующей осветительной установки**

| Оборудование                       | Мощность, Вт | Количество, шт. | Годовое энергопотребление, кВт·ч |
|------------------------------------|--------------|-----------------|----------------------------------|
| Галогенная лампа накаливания (ГЛН) | 60           | 64              | 6912                             |
| Прожектор с ГЛН                    | 50           | 48              | 8352                             |
| Прожектор с ГЛН                    | 100          | 51              | 17244                            |
| Итого                              |              |                 | 32508                            |

Таблица 4

**Расчёт энергопотребления рекомендованной осветительной установки**

| Оборудование           | Мощность, Вт | Количество, шт. | Годовое энергопотребление, кВт·ч |
|------------------------|--------------|-----------------|----------------------------------|
| Светодиодная лампа     | 9            | 64              | 725,76                           |
| Светодиодный прожектор | 9            | 48              | 1503,36                          |
| Светодиодный прожектор | 18           | 51              | 3103,92                          |
| Итого                  |              |                 | 5333,04                          |

Расчёт стоимости существующей и рекомендованной осветительных установок

| Оборудование                       | Мощность, Вт | Стоимость, TL/ед. | Количество, шт. | Общая стоимость, TL |
|------------------------------------|--------------|-------------------|-----------------|---------------------|
| Галогенная лампа накаливания (ГЛН) | 60           | 9                 | 64              | 576                 |
| Прожектор с ГЛН                    | 50           | 25                | 48              | 1200                |
| Прожектор с ГЛН                    | 100          | 40                | 51              | 2040                |
| Светодиодная лампа                 | 9            | 10                | 64              | 640                 |
| Светодиодный прожектор             | 9            | 150               | 48              | 7200                |
| Светодиодный прожектор             | 18           | 250               | 51              | 12750               |

Таблица 6

Сравнение ежегодных затрат на существующую и рекомендованную осветительные установки с учётом первоначальных инвестиций

| Осветительная установка | Количество, шт. | Годовое энергопотребление, кВт·ч | Ежегодная стоимость э/э, TL | Первоначальные инвестиции, TL | Общая стоимость, TL |
|-------------------------|-----------------|----------------------------------|-----------------------------|-------------------------------|---------------------|
| На основе ГЛН           | 163             | 32508                            | 27228,7                     | 3816                          | 31044,7             |
| Светодиодная            | 163             | 5333,04                          | 4466,95                     | 20590                         | 25056,95            |
| Экономия                |                 | 27174,96                         |                             |                               | 5987,75             |

ставленные в табл. 2, были получены с помощью расчёта в среде моделирования и являются значениями в центральной точке каждой зоны. Среднее значение освещённости на этой поверхности в соответствии с табл. 2 составляет 118,29 лк. Согласно регламентируемым значениям МКО уровень освещённости для мест поклонения культа должен быть 100 лк или выше. Очевидно, что использование светодиодной лампы мощностью 9 Вт является более энергоэффективным по сравнению с галогенной лампой накаливания мощностью 60 Вт.

#### 4. Экономический анализ

Суточное потребление энергии для каждого осветительного прибора можно рассчитать, как указано в уравнении 1.

$$E = P_b \cdot n_a \cdot t_{op} \quad (1)$$

где  $E$  (Вт·ч) – потребляемая энергия,  $P_b$  (Вт) – мощность одной галогенной лампы накаливания,  $n_a$  – количество рожков люстры, а  $t_{op}$  (ч) – время работы светильника, которое равно суточному значению 2, 5 и 12 ч в зависимости от расположения светильника как внутри помещения, так и снаружи. Годовое энергопотребление существ-

вующей и рекомендованной осветительных установок рассчитывалось с помощью уравнения 1, и приведены в табл. 3 и табл. 4, соответственно. А также был проведён анализ стоимости реконструкции, затраты на которую приведены в табл. 5.

По данным регулирующего органа рынка электроэнергии Турции, по состоянию на 01.01.2020 цена за единицу электроэнергии была определена в размере 0,8376 TL<sup>1</sup>/кВт·ч. Суммарное снижение энергопотребления составляет 27174,96 кВт·ч, таким образом экономия в денежном эквиваленте рассчитывается 27174,96 кВт·ч × 0,8376 = 22761,7 TL. За счёт снижения стоимости обслуживания осветительной установки (здесь учитывается только стоимость э/э) рекомендуемая светодиодная осветительная установка окупится примерно через 9 месяцев. Следует отметить, что сроки службы ламп не учитываются. Понятно, что срок окупаемости ещё больше сократится при рассмотрении сроков службы обоих типов ламп. Ежегодное сравнение затрат на существующую и рекомендованную осветительные установки с учётом первоначальных инвестиций приведено в табл. 6.

<sup>1</sup> Здесь и далее: TL – турецкая лира

#### 5. Заключение

В данном исследовании рассматривается освещение исторического здания. В качестве примера была выбрана древняя мечеть, построенная в начале XVI века. Исследование включает в себя физическую установку осветительных приборов. В рамках исследования был осуществлён монтаж светодиодных систем освещения с сохранением первоначального состояния здания.

В данном исследовании наиболее важной ситуацией является экспертиза с точки зрения энергоэффективности и энергосбережения. Расчёты стоимости были сделаны для тех случаев, когда освещение производится с помощью традиционных и светодиодных источников света. В результате анализа проведённых расчётов было отмечено, что при реконструкции осветительной установки и замене на светодиодные источники света можно сэкономить большое количество энергии.

Было доказано, что освещение в центральной части мечети (зона б) должно быть в течение всего дня. Было проведено сравнение существующей на основе галогенных ламп накаливания 60 Вт и рекомендованной на основе светодиодов 9 Вт ОУ

для этой зоны с точки зрения энергопотребления. Мгновенная общая энергия, потребляемая галогенными лампами, составляет 1920 Вт, а мгновенная общая энергия, потребляемая 32 светодиодными лампами, – 288 Вт. Соответственно, очевидно, что при использовании осветительной установки на основе светодиодов, обеспечивающей регламентируемый уровень освещённости согласно стандартам МКО 100 лк и выше, достигается экономия 85 %. Средний уровень освещённости, создаваемый в центральной части мечети светодиодным освещением при моделировании, составляет 118,29 лк.

### Благодарности

Автор хотел бы поблагодарить Главное управление фондов, управления поселением Диярбакыра, Турция, за их ценный вклад.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ:

1. *Cengiz M.S.* Simulation and Design Study for Interior Zone Luminance In Tunnel Lighting. // *Light & Engineering*, 2019. V27, #2, pp. 42–51.
2. *Iacomussi Rossi G., Soardo P.* Energy Saving and Environmental Compatibility in Road Lighting // *Light & Engineering*, 2012. V20, #4, pp. 55–63.
3. *Cengiz M.S.* The Relationship between Maintenance Factor and Lighting Level in Tunnel Lighting. // *Light & Engineering*, 2019. V27, #3, pp. 75–88.
4. *Cole M, Driscoll T.* The Lighting Revolution: If We Were, Experts Before, We're Novices Now. // *IEEE Transactions on Industry Applications*, 2014. V50, #2, pp. 1509–1520
5. *Coşkun T., Gülhan Ö., Şahin C.D., Arsan, Z. D., Akkurt, G. G.* The effect of spatial interventions on historic buildings' indoor climate (Case Study: Tire Necip Paşa Library, Izmir-Turkey) // *Energy Procedia*, 2017. V133, pp. 358–366.
6. *Kamaruzzaman, S. N., Zulkifli, N.* A Review of the Lighting Performance in Buildings through Energy Efficiency, presented at the 2nd International Conference on Research in Science, // *Engineering and Technology (ICRSET'2014)*, March 21–22, 2014, Dubai (UAE).
7. *Almodovar-Melendo, J. M., Cabeza-Lainez, J. M., Rodriguez-Cunill, I.* Lighting features in historical buildings: Scientific analysis of the Church of Saint Louis of the Frenchmen in Sevilla // *Sustainability*, 2018. V10, #9, pp. 1–23.
8. *Cesario E., Grifoni R.C., Leuzzi A. Pacioti D.*, Light design in historical buildings: Parameters and prototypes. Comparison of façade behavior: Metal meshes vs. high-tenacity polymer composite meshes, // presented at International Conference on Environment and Electrical Engineering, 2016, pp. 1–5.

9. *Zakaria S. A., Bahauddin A.* Light Art for Historical Buildings: A Case Study of the Heritage Buildings in George Town, Penang Island, *Procedia // Social and Behavioral Sciences*, 2015, V184, pp. 345–350.

10. *Salvadori G., Fantozzi F., Rocca, M., & Leccese F.* The energy audit activity focused on the lighting systems in historical buildings // *Energies*, 2016. V9, #12, pp. 1–13.

11. *Górczewska M.* Some aspects of architectural lighting of historical buildings. // *WIT Transactions on the Built Environment*, 2011. V121, pp. 107–116.

12. *Balocco C., Volante, G.* A method for sustainable lighting, preventive conservation, energy design and technology-Lighting a historical church converted into a university library // *Sustainability*, 2019 V11, #11, pp. 1–17.

13. *CIE Lighting of Indoor Work Places ISO 8995:2002(E) CIE S008/E-2001.* <http://cie.co.at>

14. *Xu X., Collin A., Djokic S.Z. Langel-la R., Testa A., Drapela J.*, Experimental evaluation and classification of LED lamps for typical residential applications, presented at 2017 IEEE PES Innovative Smart Grid Technologies Conference Europe // *ISGT-Europe 2017*, pp. 1–6.

15. *Kim J., Sa G., Kim Y., Baek J.* LED-ID application for intelligent lighting, presented at International Conference on Ubiquitous and Future Networks // *ICUFN*, 2015-August, pp. 225–227.

16. *Matvoz D., Maksić M.* Comparison of LED and CFL lamps and their impact on electric power network, presented at Harmonics and Quality of Power (ICHQP) // 2012 IEEE 15th International Conference on, Hong Kong, 2012, pp. 320–327.

17. *Yurci Y., Cengiz Ç., Yapıcı İ., Cengiz MS., Yıldırım S., Eren M., Palta O., Atiç S.* Analysis of Energy Productivity in LED Illumination by Active or Passive Methods. International Conference on Multidisciplinary, Engineering, Science // *Education and Technology*, 2017, Baku

18. *Onaygil S., Güler Ö., Erkin E.* Cost Analyses of LED Luminaires In Road Lighting // *Light & Engineering*, 2019, V20, #2, pp. 39–45.

19. *Cengiz Ç., Kaynaklı M., Gencer G., Eren M., Yapıcı İ., Yıldırım S., Cengiz MS.* Selection Criteria and Economic Analysis of LEDs, Book of Abstracts // *Imeset Int. Conf. Mult. Sci. Eng. Tech.*, October 27–29, 2017, Bitlis, Turkey.

20. *Yurci Y., Yıldırım S., Palta O., Cengiz Ç., Atiç S., Yapıcı İ., Cengiz MS., Eren M.* (2017). Numerical Analysis of LED Illumination Productivity Parameter. International Conference on Multidisciplinary, Engineering, Science // *Education and Technology (IMESET'17 Baku)*

21. *Yıldırım S., Yapıcı İ., Atiç S., Eren M., Palta O., Cengiz Ç., Cengiz M.S., Yurci Y.* Numerical Analysis of Productivity and Redemption Periods in LED Illumination. *Imeset Book of Abstracts // Int. Conf. Mult. Sci. Eng. Tech.*, 12–14 July 2017, Baku

22. *Cengiz, M.S., Cengiz, Ç.* Numerical Analysis of Tunnel LED Lighting Maintenance Factor. // *IJUM Engineering Journal*, 2018. V19, #2, pp. 154–163.

23. *Çıbuk M., Arı D., Ağgün F.* Relay Mechanism with Three way Handshake for Wireless Sensor Networks // the 8th International Advanced Technologies Symposium, Elazığ, 2017.

24. *Çıbuk, M., Cengiz, M.S.* Determination of Energy Consumption According To Wireless Network Topologies In Grid-Free Lighting Systems. // *Light & Engineering*, 2020. V28, #2, pp. 67–76.

25. *Cengiz MS. Cengiz Ç.* (2017). IOT and Lighting Automation. International Conference on, Imeset Book of Abstracts // *Int. Conf. Mult. Sci. Eng. Tech.*, 12–14 July 2017, Baku

26. *Arı D., Çıbuk M., Ağgün F.* Effect of Relay Priority Mechanism on Multi hop Wireless Sensor Networks, // *Bitlis Eren University Journal of Science and Technology*, 2017. V7, #2, pp. 145–153.

27. *Dos Santos Oliveira G., De Oliveira E.P., Da Silva A.P. De Moura Carvalho C.C. M.*, Power quality of LED lamps. Presented at International Conference on Harmonics and Quality of Power, // *ICHQP*, 2016-December, pp. 575–580.

28. *Varhan D.* LED Lighting in Historical Spaces and Applications // *Master Thesis*, Bitlis Eren University, Turkey, October 2019.

29. *Tuncer O.C.* Diyarbakır Mosques, Diyarbakır Metropolitan Municipality // *Culture and Art Publications*, Diyarbakır, 1996.

30. *Onaygil S.* TEDAŞ Genel Müdürlüğü Meslek İçi Eğitim Semineri-Gölbaşı Eğitim Tesisleri, // *Yol aydınlatma Semineri 23–24 Ocak 2007.*

31. *Onaygil S.* TEDAŞ Genel Müdürlüğü Meslek İçi Eğitim Semineri, TEDAŞ Basımevi, Ankara.



**Серхат Берат Эфе (Serhat Berat Efe),** Ph. D. (2014) Доцент кафедры электротехники Университете Бандырма

Онъеди Эйлюль. Основные направления его исследований – анализ энергосистем, качество электроэнергии и возобновляемые источники энергии



**Дерман Вархан (Derman Varhan),** M.Sc. (2019) Инженер по электротехнике и электронике в Главном управлении фондов управления поселения Диярбакыра, Турция

# Солнечные карты в проектировании солнцезащитных устройств общего положения

<sup>a</sup> А.Т. ДВОРЕЦКИЙ<sup>1</sup>, <sup>б</sup> О.В. СЕРГЕЙЧУК<sup>2</sup>, <sup>в</sup> А.В. СПИРИДОНОВ<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Крымский федеральный университет им. В.И. Вернадского, Симферополь, РФ

<sup>2</sup> Киевский национальный университет строительства и архитектуры, Киев, Украина

<sup>3</sup> Научно-исследовательский институт строительной физики РААСН, Москва, РФ

E-mail: <sup>a</sup>erces\_crimea@mail.ru, <sup>б</sup>ovsergeich@mail.ru, <sup>в</sup>spiridonov\_aleks@list.ru

## Аннотация

Для инсоляционных расчётов и проектирования солнцезащитных устройств (СЗУ), состоящих из отсеков плоскостей или ламелей, предпочтение следует отдавать способу на основе использования солнечных карт, из-за его высокой информативности и универсальности. В статье рассмотрен алгоритм проектирования СЗУ общего положения с помощью солнечной карты и теневого угламера. Приведён пример расчёта геометрических параметров СЗУ, таких как углы наклона ламелей к горизонтальной плоскости и к плоскости фасада, расстояние между ламелями с учётом экранирования светопрозрачной конструкции в период охлаждения здания и пропуска солнечной радиации в период его отопления. Предложена упрощённая формула для расчёта энергоэффективности СЗУ общего положения.

**Ключевые слова:** солнечная карта, теневой угламер, теневая маска, геометрические параметры солнцезащитного устройства, зона желательной инсоляции, зона перегрева, период охлаждения здания.

## Введение

Решающее влияние на температурный режим помещений оказывает Солнце. Даже в районах с умеренным климатом прирост солнечного тепла через окна в летнее время может быть чрезмерным. Снижать перегрев помещения летом можно следующими способами: 1) разворотом здания фасадом с максимальным количеством окон к северу, однако при этом пассивный солнечный обогрев помещений зимой через окна значительно уменьшается; 2) применением специальных стеклопакетов, работающих как тепловые фильтры, что при этом также снижает поступление тепла не только летом, но и зимой; 3) применением солнцезащитных устройств (СЗУ) оптимизированной геометрии.

Рационально спроектированное СЗУ экранирует солнечную радиацию в период перегрева, способствует лучшему использованию естественного света, устраняет слепящее действие и обеспечивает поступление солнечного тепла в помещение зимой.

## Анализ последних достижений и публикаций

Простой инструмент для определения затеняемой части неба из определённой точки модели (расчётная точка) на солнечной карте – теневая маска. При любом заданном наборе затеняющих объектов их теневая маска может налагаться на солнечную карту, чтобы показывать, как в любой

момент года расчётная точка инсолируется [1]. Построение теневых масок может производиться с помощью теневых угламеров. Последние для горизонтальных и вертикальных затеняющих элементов рассмотрены в книге [2].

В статье [3] сообщается о расчётах и анализе защитных характеристик СЗУ, которые позволяют сформировать предварительные указания по энергоэффективности различных типов СЗУ. Однако корректно определять энергоэффективность СЗУ можно лишь с помощью комплексных солнечных карт, на которых обозначены зоны желательной и нежелательной инсоляции [4].

В своде правил [5] установлены основные требования к СЗУ зданий и правила их проектирования на территории РФ при строительстве, реконструкции и капитальном ремонте жилых, общественных и производственных зданий. Для обеспечения нормативных требований к теплозащите, защите от солнечной радиации и естественному освещению в помещениях разного назначения данный свод правил определяет основные типы СЗУ по их местоположению, конструктивным особенностям, материалам изготовления и способам регулирования. Для проектирования стационарных СЗУ рациональной формы предложена методика с использованием солнечных карт. Для инсоляционных расчётов и проектирования СЗУ, со-

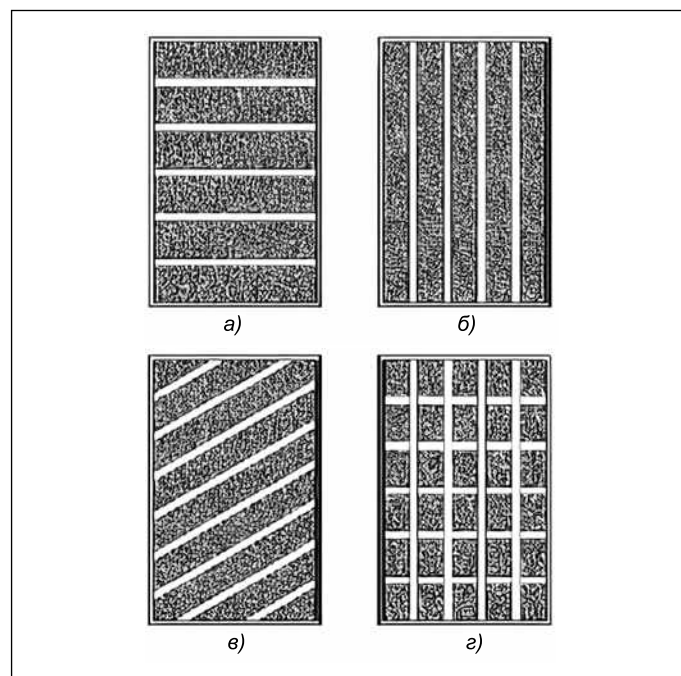


Рис. 1. Разные положения затеняющих элементов СЗУ: а – горизонтальные; б – вертикальные; в-общего положения; з – комбинированные

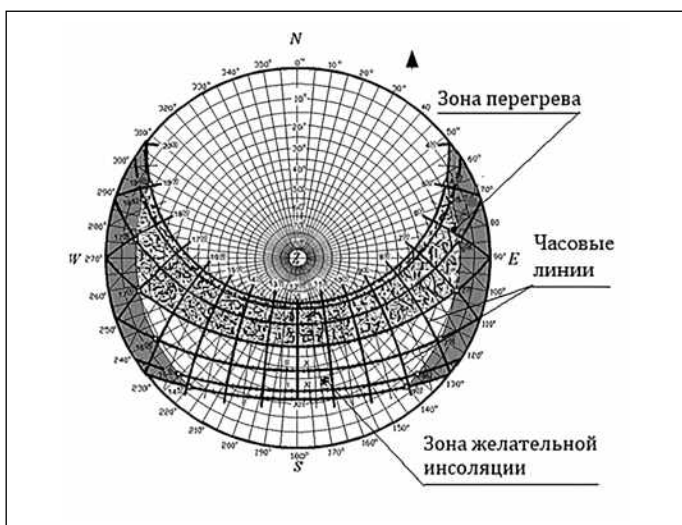


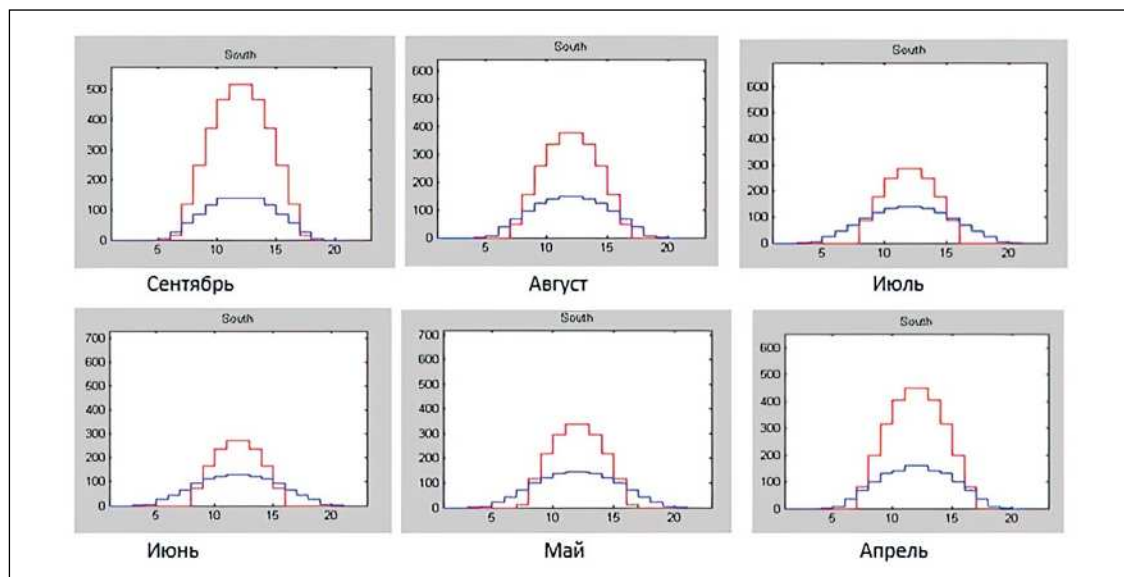
Рис. 2. Солнечная карта с зонами перегрева и желательной инсоляции для Симферополя

стоящих из отсеков плоскостей или ламелей, предпочтение надо отдавать способу, основанному на использовании солнечных карт, из-за его высокой информативности и универсальности [5]. При этом положение затеняющих элементов СЗУ (рис. 1) определяется посредством солнечной карты и зависит от широты местности и ориентации фасада [5].

Солнечные карты используются для оценки необходимости отопления и кондиционирования воздуха в помещениях в разных климатических районах страны. Климатические параметры, влияющие на выбор типа СЗУ, рассмотрены в статье [6].

Периоды отопления здания образуют на солнечной карте зону желательной инсоляции, а периоды охлаждения здания – зону нежелательной инсоляции или зону перегрева. Солнечная карта с зоной перегрева и зоной желательной инсоляции в период между 22 марта и 22 сентября с суммарной годовой солнечной радиацией на горизонтальную поверхность в условиях действительной облачности для IV и V климатических зон (рис. 2) заимствована из свода правил [5].

Рис. 3. Прямая и рассеянная радиации при действительной облачности в Симферополе (Вт/м<sup>2</sup>)



Настоящая статья посвящена созданию методики определения геометрических параметров оптимизированных СЗУ и оценки их энергоэффективности с помощью солнечных карт и теневых угломеров.

### Солнечная радиация и период охлаждения здания

Солнечная радиация, падающая на фасад здания, содержит прямую, рассеянную и отражённую составляющие. Отражённая радиация во многом зависит от окружающей застройки, и её учёт при проектировании крайне сложен. Данные по прямой и рассеянной радиации взяты из климатического справочника [7].

В Симферополе период охлаждения зданий длится почти пять месяцев – с 10 мая по 28 сентября [8, табл. А.2]. Это соответствует зоне перегрева на солнечной карте (рис. 2). Для этих месяцев в статье [9] приведены графики прямой и рассеянной радиации (рис. 3), показывающие, что рассеянная радиация в этот период меняется незначительно.

С достаточной для оценочных расчётов точностью, можно считать, что СЗУ экранируется лишь прямая солнечная радиация. Это согласуется с указанием в стандарте [10]: «Если иное не определено на национальном уровне, расчёт понижающих коэффициентов затенения должен основываться на следующих упрощениях. Прямая солнечная радиация поглощается преградой; рассеянная радиация и отражённая от Земли радиация остаётся неизменной. Это идентично препятствиям, которые отражают такое же количество солнечной радиации, какое и поглощают».

В общем случае коэффициент эффективности СЗУ  $F_{sh,0}$  определяется как [10]

$$F_{sh,0} = \frac{I_{sol,ps,mean}}{I_{sol,mean}}$$

где  $I_{sol, ps, mean}$  – средняя энергетическая освещённость рассматриваемой поверхности от солнечной радиации с учётом имеющегося затенения, Вт/м<sup>2</sup>;  $I_{sol, mean}$  – средняя энергетическая освещённость рассматриваемой поверхности от солнечной радиации при отсутствии затенения.



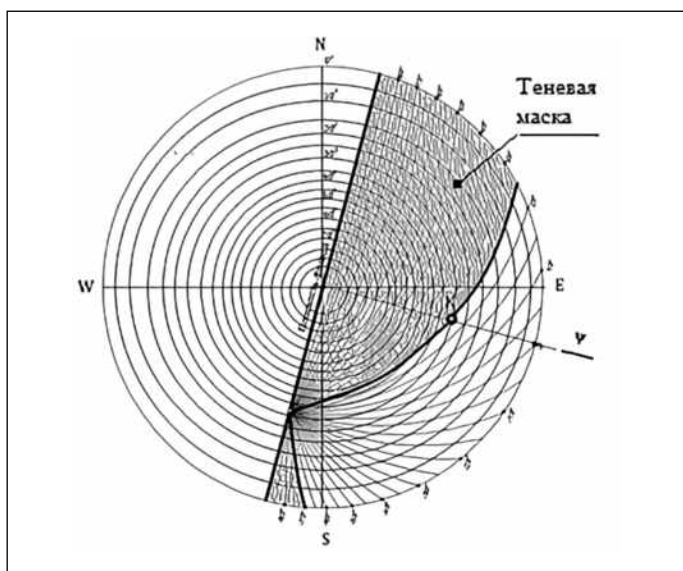


Рис. 4. Пример теневого угломера для ламелей общего положения с нанесённой теневой маской СЗУ

В статье [11] предложены формулы для расчёта коэффициентов эффективности горизонтальных ( $F_{ov}$ ) и вертикальных ( $F_{fin}$ ) СЗУ:

$$F_{ov} = \frac{S \cdot k + D \cdot \cos \alpha + 0,25 \cdot Q \cdot r \cdot (1 - \cos \alpha) + R}{S + D + R};$$

$$F_{fin} = \frac{\left[ S k + 0,5 \cdot D \cdot (1 + \cos \beta) + 0,5 \cdot D^{\perp} \cdot (1 - \cos \beta) + 0,25 \cdot Q \cdot r \cdot (1 + \cos \beta) + 0,5 \cdot R^{\perp} \cdot (1 - \cos \beta) \right]}{S + D + R},$$

где  $S, D, R$  – энергетические освещённости облучаемой поверхности от прямой, рассеянной и отражённой от Земли солнечной радиации, Вт/м<sup>2</sup>;  $Q$  – энергетическая освещённость земной поверхности от суммарной солнечной радиации, Вт/м<sup>2</sup>;  $r$  – альbedo земной поверхности (определяется с учётом наличия снежного покрова);  $k$  – коэффициент пропускания прямой солнечной радиации СЗУ;  $D^{\perp}$  – энергетическая освещённость ребра от рассеянной солнечной радиации, Вт/м<sup>2</sup>;  $R^{\perp}$  – энергетическая освещённость ребра от отражённой (от земной поверхности) солнечной радиации, Вт/м<sup>2</sup>;  $\alpha$  – угол затенения козырьком;  $\beta$  – угол затенения вертикальным ребром.

Для СЗУ общего положения можно предложить упрощённую формулу для расчёта их  $F_{sh,0}$ :

$$F_{sh,0} = \frac{S \cdot k + D + R}{S + D + R}.$$

где значения  $S, D$  и  $R$  определяются с учётом ориентации фасада по справочнику [7] или данным метеорологических наблюдений.

### Расчёт параметров конструкции СЗУ

Солнечная карта представляет собой графический инструмент для проектирования СЗУ и определения периода инсоляции. Для инсоляционных расчётов и проектирования СЗУ, состоящих из отсеков плоскостей или ламелей, предпочтение надо отдавать способу, основанному на использовании солнечных карт [12].

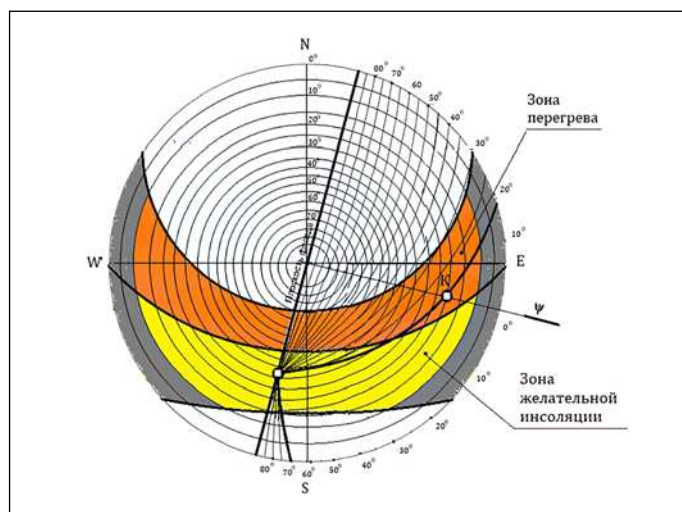


Рис. 5. Пример определения рациональной теневой маски СЗУ общего положения

Часть небесной сферы между кривой выбранного угла раскрытия и плоскостью фасада называется теневой маской СЗУ (рис. 4). Выбирать следует угол инсоляции, теневая маска которого наиболее эффективно закрывает область нежелательной инсоляции, минимально закрывая при этом область желательной инсоляции и нейтральную часть небесной сферы.

**Пример.** Требуется спроектировать СЗУ для окон фасада с азимутом 105° для здания в Симферополе. **Алгоритм расчёта геометрии эффективного СЗУ** таков:

1. На солнечную карту с наложенной теневой маской фасада накладываются теньевые угломеры так, чтобы плоскость фасада на угломере совпала с плоскостью фасада на теневой маске. Теньевые угломеры для расчёта разных СЗУ приведены в своде правил [5, Приложение II].

2. Теньевым угломером выбирается таким образом, чтобы теневая маска максимально закрывала зону перегрева и не перекрывала большую часть зоны желательной радиации (рис. 5). Для заданной ориентации фасада целесообразно применение затеняющих элементов (ламелей) общего положения. На рис. 5 изображено применение теневого угломера с углом наклона ламелей к горизонтальной плоскости  $\mu = 30^\circ$ .

3. По выбранному теньевому угломеру определяется угол раскрытия  $\delta = 20^\circ$  и обратный угол раскрытия  $\delta_z = 70^\circ$ .

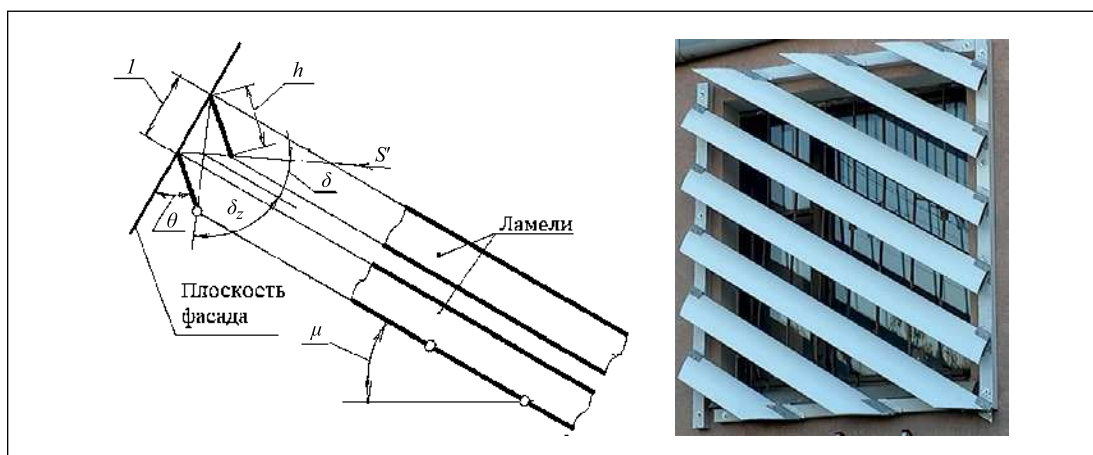
4. Выбирается угол наклона ламелей к плоскости фасада  $\theta$  (рис. 6). Сегодня выпускаются кронштейны, позволяющие устанавливать ламели под углом к фасаду 90°, 60° и 45°. С помощью них может обеспечиваться значение  $\theta = 45^\circ$ , ближайшее к значению  $\delta = 20^\circ$ .

5. Если применить в рассчитываемом СЗУ ширину ламелей  $h = 145$  мм (размер из принятого на практике типоразмера ламелей), то расстояние между затеняющими элементами  $l$  рассчитывается как

$$l = h \cdot (\cos \theta + \sin \theta \cdot \operatorname{tg} \delta) = 145 \cdot \cos 45^\circ \cdot (1 + \operatorname{tg} 20^\circ) \approx 140 \text{ (мм)}.$$

Максимальная инсоляция фасада будет иметься в вертикальной лучевой плоскости  $\psi$ , расположенной перпендикулярно плоскости фасада. Для проектирования СЗУ с наклонными ламелями необходимо знать угловую вы-

Рис. 6. Геометрические параметры и общий вид СЗУ общего положения:  
 $h$  – ширина ламели;  
 $l$  – расстояние между ламелями;  $\delta$  – угол раскрытия;  $\delta_z$  – обратный угол раскрытия;  $\theta$  – угол наклона ламелей к плоскости фасада;  $\mu$  – угол наклона затеняющих элементов к горизонтальной плоскости



соту Солнца  $\varphi$  в плоскости  $\psi$ . Последняя совпадает с нулевым направлением на теневом угломере.  $\varphi$  в плоскости  $\psi$  определяется по альмукантарате, с которой пересекается кривая угла раскрытия. На рис. 5 точка  $K$  есть точка пересечения кривой угла  $\delta = 20^\circ$  и плоскости  $\psi$ . При этом  $\varphi = 23^\circ$ .

Рассмотренное СЗУ установлено на экспериментальном здании под Симферополем (рис. 6).

## Выводы

Конструкция СЗУ должна, прежде всего, соответствовать ориентации фасада, обеспечивая экранирование высоких солнечных лучей в период охлаждения здания и пропускание солнечных лучей в отопительный период. Предпочтение следует отдавать способу, основанному на использовании солнечных карт и теневых угломеров, из-за его высокой информативности и универсальности. Этот способ позволяет определять параметры формы и положения СЗУ (в частности, углы наклона ламелей к горизонтальной плоскости и плоскости фасада и расстояние между ламелями), при которых будет обеспечиваться высокая энергетическая эффективность СЗУ.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Marsh A.J. The Application of Shading Masks in Building Simulation / 9<sup>th</sup> Int. IBPSA Conf. «Building Simulation 2005», Montreal, Canada, 2005.
2. Харкнес Е., Мехта М. Регулирование солнечной радиации в зданиях; Пер. с англ. Г.М. Айрапетовой. – М.: Стройиздат, 1984. – 177 с.
3. Куприянов В.Н., Спиридонов А.В. Расчёт параметров солнцезащитных устройств // Строительство и реконструкция. – 2019. – № 3 (83). – С. 54–62.
4. Спиридонов А.В., Дворецкий А.Т. Инсоляция и солнцезащита / Справочная книга по светотехнике. Изд-е 4 / Под общ. ред. Ю.Б. Айзенберга и Г.В. Бооса. – М.: Редакция журнала «Светотехника», 2019. – С. 553–566.
5. СП 370.1325800.2017 «Устройства солнцезащитные зданий. Правила проектирования».
6. Dvoretzky A.T., Spiridonov A.V., Shubin I.L., Klevets K.N. Accounting of Climatic Features in Designing Solar Shading Devices // Light & Engineering. – 2018. – Vol. 26, No. 2. – P. 162–166.
7. Научно-прикладной справочник по климату СССР. Серия 3. Многолетние данные. Части 1–6. Вып. 1–34. – Л.: Гидрометеиздат, 1989–1998.

8. Дворецкий А.Т., Спиридонов А.В., Митрофанова С.А., Денисова Т.В. О необходимости определения градусо-суток периода охлаждения зданий на территории России // Жилищное строительство. – 2019. – № 8. – С. 46–49.

9. Сергейчук О.В. Геометрична комп'ютерна модель «Atmospheric Radiation» для енергоефективного будівництва // Енергозбереження в будівництві та архітектурі. – 2011. – Вип. 1. – С. 22–28.

10. ISO 52016-1:2017 «Energy performance of buildings – Energy needs for heating and cooling, internal temperatures and sensible and latent heat loads – Part 1: Calculation procedures».

11. Сергейчук О.В., Буравченко В.С., Андропова О.В. и др. Особенности методики расчёта солнечных поступлений в национальном приложении к ДСТУ Б EN ISO 13790 // Энергоэффективность в будівництві та архітектурі. – 2014. – Вип. 6. – С. 267–272.

12. Дворецкий А.Т., Моргунова М.А., Сергейчук О.В., Спиридонов А.В. Методы проектирования стационарных солнцезащитных устройств // Строительные материалы, оборудование, технологии XXI века. – 2018. – № 11–12. – С. 6–10.



**Дворецкий Александр Тимофеевич**, доктор техн. наук, профессор. Окончил в 1971 г. Донецкий политехнический институт. Зав. кафедрой «Геометрическое и компьютерное моделирование энергоэффективных зданий» Академии строительства и архитектуры Крымского федерального университета им. В.И. Вернадского. Советник РААСН



**Сергейчук Олег Васильевич**, доктор техн. наук, профессор. Окончил в 1975 г. Киевский национальный университет строительства и архитектуры. Профессор архитектурного факультета Киевского национального университета строительства и архитектуры



**Спиридонов Александр Владимирович**, кандидат техн. наук. Окончил в 1975 г. МЭИ по специальности «Светотехника и источники света». Главный научный сотрудник НИИСФ РААСН. Президент Ассоциации производителей энергоэффективных окон (АПРОК). Лауреат Премии Правительства РФ в области науки и техники

# Сравнительный анализ характеристик светодиодных филаментных ламп для бытового освещения

Н.П. НЕСТЁРКИНА<sup>1</sup>, \* Ю.А. ЖУРАВЛЁВА<sup>2</sup>, О.Ю. КОВАЛЕНКО<sup>1</sup>, С.А. МИКАЕВА<sup>2</sup>

<sup>1</sup> НИ Мордовский государственный университет им. Н.П. Огарёва, Саранск

<sup>2</sup> МИРЭА – Российский технологический университет, Москва

\* E-mail: ulypil@mail.ru

## Аннотация

Описаны ход и результаты сравнения характеристик светодиодных филаментных ламп с колбой типа А60 четырёх производителей: ООО «Лисма» (РФ), американской компании с производством в КНР *General Lighting Co., Ltd*, совместной китайско-российской компании *Uniel* и тайваньской компании *Smartbuy* – время стабилизации характеристик, световой поток, коррелированная цветовая температура, общий индекс цветопередачи, коэффициент пульсации освещённости и спектр излучения – в течение 6000 ч горения. Явным лидером по характеристикам оказалась лампа СДФ-8 («Лисма»).

**Ключевые слова:** световой поток, световая отдача, коррелированная цветовая температура, общий индекс цветопередачи, спектр излучения, кривая силы света, освещение, время стабилизации, светодиодная лампа.

## 1. Введение

В настоящее время наиболее энергоэффективными, надёжными и пер-

спективными ИС считаются светодиодные лампы. На рынке представлен широкий ассортимент этих ИС, в том числе светодиодных филаментных (СДФ) ламп, способствующий рациональному выбору этих изделий с учётом их назначения и основных характеристик [1–6]. Целью настоящей работы являлся сравнительный анализ светотехнических характеристик СДФ ламп для бытового освещения, призванный повысить рациональность выбора этих ИС, в основном, для замены ламп накаливания.

## 2. Исследование характеристик СДФ ламп с колбой типа А60

Для сравнительных исследований были приобретены СДФ лампы производства ООО «Лисма»<sup>1</sup> (РФ), американской компании с производством в КНР *General Lighting Co., Ltd*, совместной китайско-российской компании *Uniel* и тайваньской компании *Smartbuy*. Мощности исследуемых

<sup>1</sup> Ныне ООО «СЗ Лисма». – Прим. ред.

ламп – 5, 8 и 10 Вт, тип колбы – А60, тип цоколя – Е27.

Исследования проводились в лаборатории ЦКП «Светотехническая метрология» (Институт электроники и светотехники НИУ «МГУ им. Н.П. Огарёва») на измерительном комплексе фирмы *Gooch & Housego*, содержащем фотометрический шар *OL IS7600* диаметром около 2 м, спектрорадиометр *OL 770 VIS/NIR*, прецизионный источник постоянного тока *OL410–200 PRECISION LAMP SOURCE* (для питания вспомогательной лампы), арматуру для крепления ламп и компьютер [7].

Определялось время стабилизации сравниваемых характеристик (светотехнических) СДФ ламп. Оно составило для ламп *GLDEN-A60S-10–230-E27–2700 (General Lighting Co., Ltd)* и СДФ-8 («Лисма») 5 мин, для ламп *SKY-A60–8–30K-E27 (Uniel)* – 7 мин и для ламп *SBL-A60F-5–30K-E27 (Smartbuy)* – 4 мин.

Измерения параметров ламп проводились в фотометрическом шаре, согласно ГОСТ [8, 9]. Уровень световых пульсаций измерялся с помощью люксметра-пульсметра ТКА-ПКМ 08, измеряющего коэффициент пульсации освещённости  $k_{п}$  (в области спектра 380–760 нм).

В табл. 1 представлены результаты измерений характеристик исследуемых образцов ламп и значения характеристик, заявленные производителем.

Анализ результатов показал, что измеренные значения светового потока  $\Phi_v$  у ламп производства ООО «Лисма» (780 лм) и *General Lighting Co., Ltd* (890 лм) соответствуют заявлен-

Таблица 1

Параметры образцов ламп

| Тип лампы        | СДФ-8 («Лисма»)     |                     | GLDEN-A60S-10–230-E27–2700 ( <i>General Lighting</i> ) |                     | SKY-A60–8–30K-E27 ( <i>Uniel</i> ) |                     | SBL-A60F-5–30K-E27 ( <i>Smartbuy</i> ) |                     |
|------------------|---------------------|---------------------|--|---------------------|------------------------------------|---------------------|--|---------------------|
|                  | заявленные значения | измеренные значения | заявленные значения                                    | измеренные значения | заявленные значения                | измеренные значения | заявленные значения                    | измеренные значения |
| $\Phi_v$ , лм    | 780                 | 770                 | 890  | 870                 | 800                                | 655                 | 480                                    | 355                 |
| $T_{кц}$ , К     | 2700                | 2736                | 2700   | 2717                | 3000                               | 2991                | 3000                                   | 2946                |
| $R_a$            | > 80                | 85                  | > 80   | 85                  | > 80                               | 83                  | > 80                                   | 81                  |
| Мощность, Вт     | 8,0                 | 7,6                 | 10,0   | 7,0                 | 8,0                                | 5,4                 | 5,0                                    | 3,22                |
| $\eta_v$ , лм/Вт | 97,5                | 101,3               | 89,0   | 124,2               | 100,0                              | 121,0               | 96,0                                   | 110,0               |
| $k_{п}$ , %      | < 1                 | 0,2                 | < 5  | 0,2                 | < 5                                | 3,5                 | < 5                                    | 35                  |

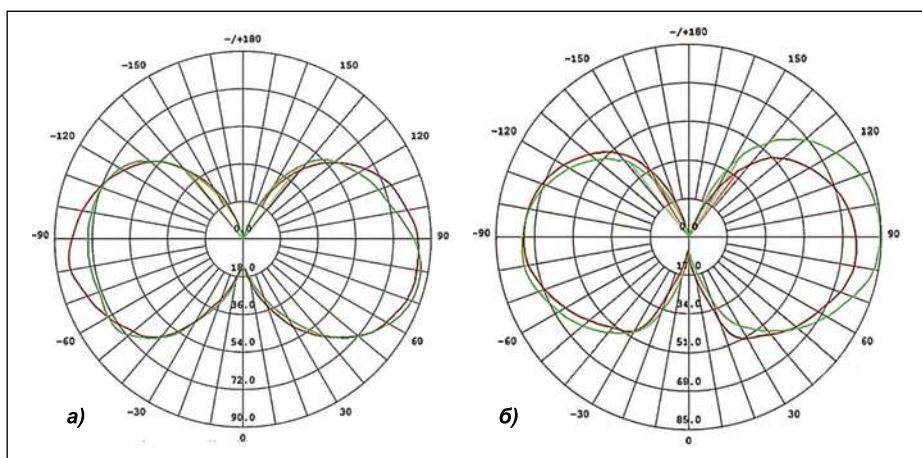


Рис. 1. КСС ламп:  
а – СДФ-А60–8–27К-Е27 («Лисма»); б – GLDEN-A60S-10-230-E27-2700 (General Lighting)

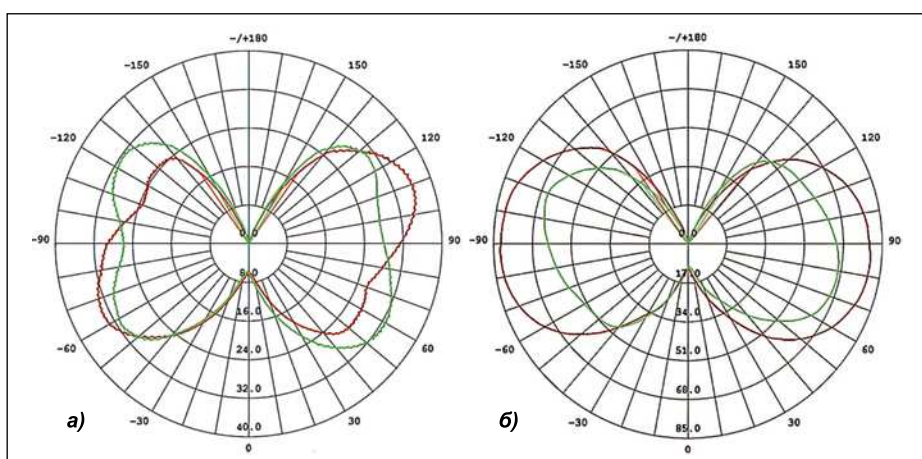
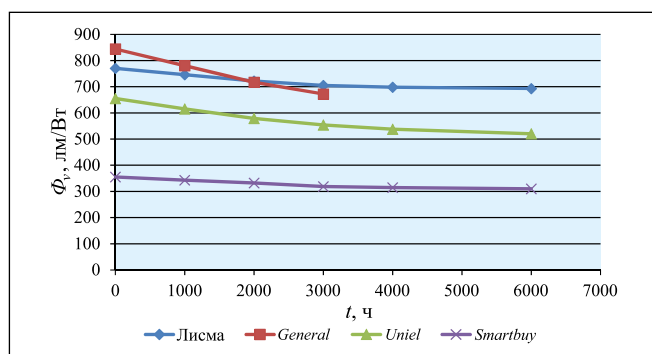


Рис. 2. КСС ламп:  
а – SBL-A60F-5-30K-E27 (Smartbuy); б – SKY-A60-8-30K-E27 (Uniel)

Рис. 4. Динамика спада светового потока сравниваемых ламп



ным значениям (770 и 870 лм соответственно), а у ламп производства Uniel и Smartbuy они заметно ниже (655 и 355 лм) заявленных (800 и 480 лм соответственно). Измеренные значения коррелированной цветовой температуры  $T_{кц}$  и общего индекса цветопередачи  $R_a$  у ламп всех производителей соответствуют заявленным. А мощность только у лампы «Лисма» близка к заявленной, у остальных же она на 30 % меньше заявленной. Реально меньшая на 30% (3 Вт) мощность

лампы GLDEN-10 (General Lighting Co., Ltd) на уровне  $\Phi_v$  не отразилась – он соответствовал заявленному; у лампы производства Smartbuy снижение мощности на 32,5 % снизило  $\Phi_v$  на 18,1 %, а у лампы производства Uniel при снижении мощности на 35,6 %  $\Phi_v$  снизился на 26 %. Световая отдача  $\eta_v$  у всех исследуемых ламп оказалась выше заявленной.  $k_n$  у ламп ООО «Лисма» и General Lighting Co., Ltd оказалась значительно ниже заявленного – 0,2 %, у лампы SKY-8 (Uniel) – в преде-

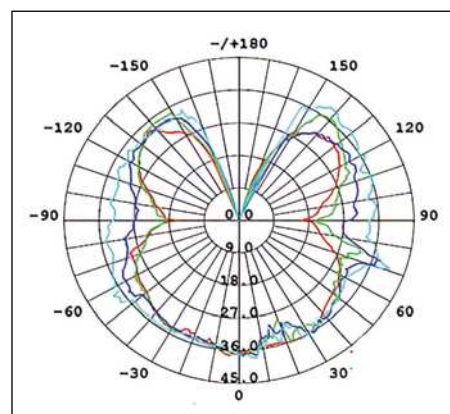


Рис. 3. КСС лампы накаливания Б230–40 (с колбой А60)

лах нормы, а у лампы SBL-5 (Smartbuy) составил не менее 35 % (!).

С помощью спектрорадиометра OL 770VIS/NIR снимались спектры излучения ламп. Спектр излучения СДФ ламп сплошной, занимает всю видимую область и его пиковая длина волны лежит в жёлто-оранжевой части спектра, обуславливая тепло-белый свет ламп. По цветовому графику МКО 1931 координаты цветности лампы СДФ-8 («Лисма») – (0,4558, 0,4104), что соответствует  $T_{кц}$  2700 К, а координаты цветности лампы SKY-A60-8-30K-E27 (Uniel) – (0,4338, 0,4009), что соответствует  $T_{кц}$  3000 К.

На гониофотометрическом комплексе GO 2000A (Everfine) снимались КСС исследуемых ламп (рис. 1 и 2). Как видно из рисунков, формы КСС ламп преимущественно синусные [10]; у лампы типа СДФ-А60–8–27К-Е27 максимальная сила света составляет 87 кд, у лампы SBL-A60F-5-30K-E27 – 35 кд, у лампы GLDEN-A60S-10-230-E27-2700 – 84 кд и у лампы SKY-A60-8-30K-E27 – 83 кд. Для сравнения, на рис. 3 приведена КСС лампы накаливания Б230–40 (с колбой А60) [11]. Как видим, КСС СДФ ламп лишь незначительно отличаются от КСС лампы накаливания.

В табл. 2 приведены результаты измерений характеристик СДФ ламп после 1000, 2000, 3000, 4000 и 6000 ч их непрерывного горения и результаты расчёта, согласно ГОСТ [8], коэффициента сохранения светового потока ламп через  $n$  ч горения ( $L$ ) по формуле  $L = (\Phi_{v,n} / \Phi_{v,0}) \cdot 100$ , %, где  $\Phi_{v,0}$  – начальный  $\Phi_v$ ,  $\Phi_{v,n}$  –  $\Phi_v$  через  $n$  ч горения. При этом лампа GLDEN-A60S-10-230-E27-2700 (General Lighting Co., Ltd) вышла из строя после 3466 ч горения.

Временная зависимость параметров образцов ламп

| Тип лампы  | Параметры     | Время горения, ч |      |      |      |      |      |
|--|---------------|------------------|------|------|------|------|------|
|  |               | 0,25             | 1000 | 2000 | 3000 | 4000 | 6000 |
| СДФ-8<br>(«Лисма»)                               | $\Phi_v$ , лм | 770              | 746  | 722  | 705  | 700  | 693  |
|  | $k_{п}$ , %   | 5                | 0,5  | 0,5  | 2    | 0    | 0,5  |
|  | $L$ , %       |                  | 96,9 | 93,8 | 91,6 | 90,9 | 90,0 |
| GLDEN-A60S-10-230-E27-2700<br>(General Lighting) | $\Phi_v$ , лм | 844              | 771  | 702  | 672  |      |      |
|  | $k_{п}$ , %   | 5                | 0,2  | 2    | 3,5  |      |      |
|  | $L$ , %       |                  | 91,4 | 83,2 | 79,6 |      |      |
| SKY-A60-8-30K-E27 (Uniel)                        | $\Phi_v$ , лм | 655              | 605  | 579  | 554  | 529  | 520  |
|  | $k_{п}$ , %   | 5                | 3,5  | 3,5  | 0,5  | 0    |      |
|  | $L$ , %       |                  | 92,4 | 88,4 | 84,6 | 80,8 | 79,4 |
| SBL-A60F-5-30K-E27<br>(Smartbuy)                 | $\Phi_v$ , лм | 355              | 343  | 332  | 319  | 315  | 310  |
|  | $k_{п}$ , %   | 5                | 35   | 35   | 30   | 25,5 | 26   |
|  | $L$ , %       |                  | 96,6 | 93,5 | 89,9 | 88,7 | 87,3 |

На рис. 4 представлены графики изменения  $\Phi_v$  ламп при непрерывном горении.

В ГОСТ [8] установлены 5 категорий по  $L$ : А, В, С, D и E, каждая из которых характеризуется снижением  $\Phi_v$  от номинального по сравнению с предыдущей категорией на 10 %, с  $\Phi_{v,0}$  при 0 ч.

По результатам испытаний после 6000 ч горения лампу СДФ-8 («Лисма») можно условно отнести к категории А, лампу SKY-A60-8-30K-E27 (Uniel) – к категории В, а лампу SBL-A60F-5-30K-E27 (Smartbuy) можно тоже условно отнести к категории А, но у неё слишком высокий  $k_{п}$ .

### 3. Анализ результатов сравнения характеристик ламп

В результате исследований ламп в течение 6000 ч непрерывного горения можно сделать следующие выводы:

– лампа СДФ-8 («Лисма») имеет наибольший  $L$  (90 %) и наименьший  $k_{п}$ ;

– лампа SBL-A60F-5-30K-E27 (Smartbuy) имеет  $L = 87,3$  % и наибольший  $k_{п}$ , превышающий допустимую норму в 7 и более раз;

– у лампы SKY-A60-8-30K-E27 (Uniel)  $L = 79,4$  %, а  $k_{п}$  не выше нормированного;

–  $T_{ки}$  у всех ламп практически не менялись (с учётом допустимых погрешностей).

Лампа GLDEN-A60S-10-230-E27-2700 (General Lighting Co., Ltd), как уже говорилось, вышла из строя после 3466 ч горения, её  $L$  после 3000 ч горения составил 79,6 %, а  $k_{п}$  не выше нормированного. В результате эту СДФ лампу не следует рекомендовать для освещения бытовых помещений из-за низкого срока службы и  $L$ . При этом, согласно ГОСТ [8], её можно отнести к категории С.

Из всех исследованных СДФ ламп лишь лампа СДФ-8 («Лисма») может относиться к категории А, по ГОСТ [8], и только её можно рекомендовать для применения в осветительных приборах для бытового освещения

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Железникова О.Е., Мохаммед С.Д., Михалькова А.Н., Микаева С.А. Освещение светодиодными источниками света // Автоматизация. Современная технология. – 2019. – Т. 73, № 12. – С. 540–543.

2. Железникова О.Е., Амелкина С.А., Сиднишина Л.В. Об эффективности освещения светодиодами по зрительной работе // Светотехника. – 2018. – № 2. – С. 6–10.

3. Журавлёва Ю.А., Коваленко О.Ю., Микаева С.А., Атишев А.В., Немов В.В. Исследование влияния форм-фактора светодиодных ламп для бытового освещения на их светотехнические характеристики // Энергобезопасность и энергосбережение. – 2019. – № 6. – С. 24–27.

4. Nestyorkina N.P., Kovalenko O. Yu., Zhuravlyova Yu.A. Analysis of characteristics of led lamps with T8 bulb by various manufac-

turers / Light & Engineering. – 2019. – Vol. 27, No. 6. – P. 82–87.

5. Liu J., Xu C., Zheng H., Liu S. Numerical analysis and optimization of thermal performance of LED filament light bulb / in 2017 IEEE67th Electronic Components and Technology Conference (ECTC), Orlando, FL, USA, 2017. – P. 2243–2248,

6. Xu C., Zhang Z., Chu J. Thermal dissipation enhancement of LED filament bulb by ionic wind / in 2016 17th International Conference on Electronic Packaging Technology (ICEPT), Wuhan, China, 2016. – P. 1212–1215.

7. Микаева С.А., Железникова О.Е., Сиднишина Л.В. Комплекс современного исследовательского оборудования для световых измерений // Автоматизация и современные технологии. – 2012. – № 12. – С. 33–36.

8. ГОСТ Р 54815–2011/IEC/PAS62612: 2009 «Лампы светодиодные со встроенным устройством управления для общего освещения на напряжение свыше 50 В. Эксплуатационные требования».

9. ГОСТ Р 55702–2013 «Источники света электрические. Методы измерений электрических и световых параметров».

10. ГОСТ Р 54350–2015 «Приборы осветительные. Светотехнические требования и методы испытаний».

11. Нестёркина Н.П., Кондрашин А.С. О характеристиках светодиодных филаментных ламп мощностью 4, 6, 8 Вт / Проблемы и перспективы развития отечественной светотехники, электротехники и энергетики: материалы XIII Всероссийской научно-технической конференции с международным участием (15–17 марта 2017 г., Саранск) в рамках IV Всероссийского светотехнического форума с международным участием. – Саранск: Афанасьев В.С., 2017. – С. 358–366.

## Разработан способ искривления фотонной струи



**Нестёркина Нина Петровна**, инженер. Окончила в 1975 г. МГУ им. Н.П. Огарёва по специальности «Светотехника и источники света». Зав. лабораторией, и старший преподаватель кафедры источников света

Института электроники и светотехники Национального исследовательского Мордовского государственного университета им. Н.П. Огарёва. Область научных интересов: разрядные и светодиодные источники света, светотехнические установки, схемотехника



**Коваленко Ольга Юрьевна**, доктор техн. наук, доцент. Окончила в 1983 г. МГУ им. Н.П. Огарёва по специальности «Светотехника и источники света». Профессор кафедры метрологии, стандартизации и серти-

фикации Института электроники и светотехники Национального исследовательского Мордовского государственного университета им. Н.П. Огарёва. Область научных интересов: измерение и контроль параметров осветительных и облучательных систем



**Журавлёва Юлия Алексеевна**, кандидат техн. наук, доцент. Окончила в 2010 г. МГУ им. Н.П. Огарёва по специальности «Светотехника и источники света». Доцент кафедры источников света Института

электроники и светотехники Национального исследовательского Мордовского государственного университета им. Н.П. Огарёва и кафедры электроники РТУ «МИРЭА». Область научных интересов: энергосберегающие светотехнические установки; параметры компактных люминесцентных ламп и светодиодных источников света; вакуумная техника



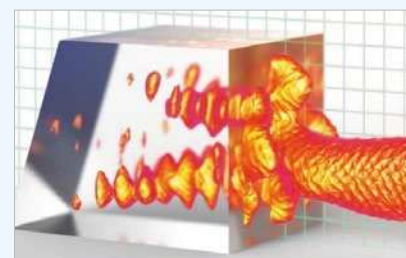
**Микаева Светлана Анатольевна**, доктор техн. наук, доцент. Окончила в 1988 г. МГУ им. Н.П. Огарёва по специальности «Светотехника и источники света». Зав. кафедрой электро-

логического института РТУ «МИРЭА». Область научных интересов: светотехника и источники света, технология приборостроения, контроль и диагностика приборов, твердотельная электроника, радиоэлектронные компоненты, приборы на квантовых эффектах

Российские учёные совместно с иностранными коллегами нашли простой способ создания из фотонной струи фотонного крючка. Для этого они частично перекрыли струю металлическим экраном. Исследование опубликовано в журнале «Optics Letters» (URL: <https://doi.org/10.1364/OL.402248>).

Фотонная струя представляет собой электромагнитную волну, сфокусированную у поверхности микросферы из кварцевого стекла, которая сама находится в фокусе линзы. Она привлекает внимание учёных своим необычным размером, который меньше дифракционного предела – минимального размера, получаемого с помощью электромагнитного излучения. Благодаря этой особенности фотонной струи, например, был создан наноскоп, который позволил рассматривать объекты размером в 50 нм, что было невозможно с помощью традиционных оптических микроскопов.

Учёные из Томского политехнического университета совместно с зарубежными коллегами разработали новый тип искривлённого светового луча на основе фотонной струи – фотонный крючок. Его получать значительно проще, чем известные аналоги. Для этого нужна лишь микрочастица определённой формы, через которую свет проходит и искривляется. Так получается фотонная струя, но если часть частицы перекрыть специальным экраном, то получится уже фотонный крючок. Фотонный крючок, например, позволяет перемещать наночастицы под действием давления света, обогнуть барьер, переносить их через него. Это делает его перспективным инструментом для биологии, медицины, производства микросхем,



создания новых материалов, где необходимо управлять клетками.

«Для получения фотонной струи и фотонного крючка используются микрочастицы из диэлектрического материала, например стекла. До сих пор считалось, что для этого нужны частицы разной формы. Для фотонной струи симметричные, для крючка – несимметричные. Однако оказалось, что это совсем не так. Мы провели моделирование и ряд экспериментов, которые показали, что в обоих случаях можно использовать симметричные частицы. Для этого мы немного перекрыли частицу экраном из металла. Экран микроразмера может быть из любого металла, но в экспериментах мы использовали алюминий», – говорит руководитель проекта, профессор отделения электронной инженерии ТПУ Игорь Минин.

По словам учёных, можно соединять фотонную струю и крючок в одном устройстве. И тогда, например, с помощью струи можно как бы захватывать и притягивать наночастицы, а если подставить экран, то луч искривится и частицы можно будет перемещать.

indicator.ru  
03.09.2020

## ПАРТНЁРЫ ЖУРНАЛА

Редколлегия и редакция с большим удовлетворением отмечают организацию сообщества «Партнёры журнала «Светотехника» и выражают благодарность нашим партнёрам, поверившим во взаимную эффективность такого сотрудничества



International  
Lighting  
Engineering  
Corporation



interlight  
RUSSIA

intelligent building  
RUSSIA

# Исследование безопасности и светотехнических параметров светодиодной лампы прямой замены<sup>1\*</sup>

Ц.-Т. КИМ<sup>1</sup> Ч.-Х. КИМ<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Корейский испытательный и научно-исследовательский институт

<sup>2</sup>Университет Квангвун

Email: bighhs@naver.com

## Аннотация

По мере возникновения проблем энергоэффективности и энергосбережения появилась потребность в высокоэффективных осветительных приборах, которые смогут заменить светильники с традиционными источниками света. Так светодиодное освещение стало освещением нового поколения. Поскольку светодиод обладает низкой мощностью, высокой эффективностью, длительным сроком службы и быстрой скоростью отклика, он подходит для замены традиционных источников света, таких как лампы накаливания, люминесцентные лампы и галогенные лампы. Настоящее исследование посвящено вопросам безопасной замены КЛЛ в бытовых ОП с точки зрения ограничения возможного возникновения дискомфорта от светодиодной лампы, предоставления эталонных значений для светодиодной лампы для предотвращения увеличения инвестиционных затрат производителей, выявления проблем безопасности при прямой замене и стандартизации оптимального метода питания, который может быть исправлен с помощью светодиодной лампы, конструкция которой включает в себя внешний преобразователь тока.

**Ключевые слова:** светильник со светодиодами, светодиодное освещение, стандарты безопасности для электроприборов, стандарты безопасности электроприборов в Корее, управление электробезопасностью, сертификация безопасности, балласт, прямая замена, источник питания, способ подключения.

<sup>1</sup> Прямая замена – это технология, которая управляет светодиодами на переменном токе без использования преобразователей переменного тока в постоянный.

\* Перевод с англ. – Т.В. Мешковой

## 1. Введение

### 1.1. Основание для настоящего исследования

Рынок светодиодного освещения возник благодаря быстрому росту бизнеса зелёной энергии (*Green energy business*) с 2009 года. Кроме того, светильники со светодиодами заменяют светильники с традиционными источниками света с низкой эффективностью для удовлетворения потребительского спроса на повышение уровня энергосбережения. Эволюция источников света к настоящему моменту колоссальная – от освещения свечами в прошлом, к лампам накаливания, люминесцентным лампам и, наконец, СД ИС.

Благодаря спросу на замену люминесцентных ламп светодиодными источниками света на рынке стали появляться соответствующие осветительные приборы. В частности, активно стали разрабатываться светодиодные лампы для прямой замены люминесцентных в существующих светильниках для повышения энергоэффективности и сокращения использования ртути в экологических целях. До недавнего времени в домах, офисах и промышленных объектах активно применялись люминесцентные лампы, но в последнее время стали использоваться линейные светодиодные лампы с цоколем G13.

Кроме того, недавно были приняты стандарты безопасности, на основании которых была проведена сертификация ламп U-образного и линейного типа на основе СД, которые предназначены для замены компактных люминесцентных U-образных ламп в бытовых приборах домашнего использования в Корее (14.4.30).

Существуют достаточно большое количество различных типов светодиодных ламп. Первый тип из них показан в рис. 1 и представляет собой светодиодную лампу с встроенным преобразователем тока, ко-

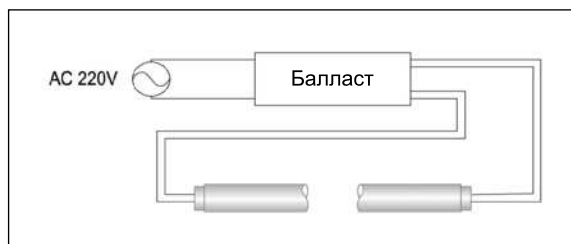


Рис. 1. Схема подключения к сети 220 В светодиодной лампы со встроенным преобразователем тока для замены линейной люминесцентной (сертифицированные лампы согласно дополнению к стандарту безопасности электроприборов: 2013.03.25 могут использоваться без модификаций)

Рис. 2. Схема подключения светодиодной лампы с внешним преобразователем переменного тока в постоянный для питания от напряжения 50 В и ниже (дополнение к стандарту безопасности электроприборов: 2010.12.21)

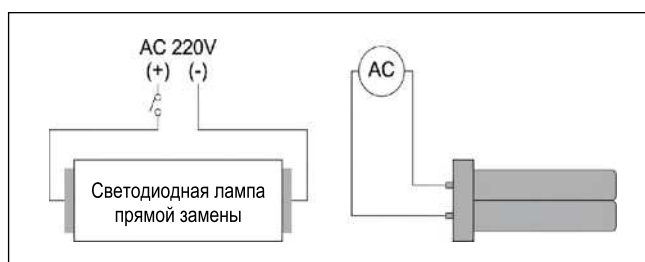


Рис. 3. Схема подключения к сети 220 В для штырьковых типов ламп с цоколями G13 (а) и G11 (б) с встроенными преобразователями тока

**Обзор рекомендуемых характеристики СД ламп для замены люминесцентных ламп  
согласно стандарту безопасности KC10025**





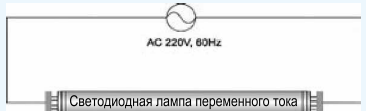
| Наименование                        | Линейного типа с цоколем G13   |                           | U-образного типа с цоколем 2G11   |             |
|-------------------------------------|--|---------------------------|---|-------------|
| Штырьковый тип цоколя               |   |                           |  |             |
| Мощность, Вт                        | 20, 32, 40   |                           | 36, 55  |             |
| Регламентируемый световой поток, лм | 20   | 1100 – 858                | 36  | 2590 – 2202 |
|                                     | 32   | 2300 (расчётное значение) | 55  |             |
| Примечание                          | Расчётный световой поток составляет 85 % от светового потока согласно стандарту KS C7601:2004 (для люминесцентной лампы) |                           |   |             |

Таблица 2

**Статус сертификации СД ламп линейного типа для замены ЛЛ**

| Метод подключения       | Совместимый с балластом (с встроенным преобразователем тока)                       | С использованием внешнего преобразователя тока                                      | Прямая замена для сети 220 В   |
|-------------------------|--|---|--|
| Схема подключения       |  |  |                            |
| Производители           | Более 20 компаний  | Более 300 компаний  | Сертифицированных компаний нет*<br>*Иностранные производственные компании не могут продавать продукцию в Корее |
| Дата внесения изменений | 2/25/2013  | 12/21/2010  | –  |
| Номер стандарта         | KC10025 (для цоколя G13)   | KC20001 (для цоколей G13 и D12)   | –  |
| Международный стандарт  | IEC 62776 (для цоколей G13 и G5)   | IEC62931 (цоколь GX16t-5)   | –  |

Примечание к табл. 2: 1. сертифицированные светильники и балласты для люминесцентных ламп используются без модернизации; 2. светодиодная лампа и преобразователь тока работают от напряжения питания 50 В и ниже.

торый используется только для светодиодных ламп, для замены, так называемой, штырьковой U-образной люминесцентной лампы с цоколем G13/2G11. Второй тип показан в рис. 2 и представляет собой замену линейной люминесцентной лампы (далее ЛЛ) с цоколем G13 на светодиодную с внешним преобразователем тока. Схема подключения к сети 220 В для штырьковых типов ламп с цоколями G13 и 2G11 представлена на рис. 3. [1]

Критерии светотехнических и электрических параметров линейной светодиодной лампы можно найти в стандартах безопасности в разделе

описания светодиодных ламп с интегрированным или внешнем преобразователем тока для замены ЛЛ. Светотехнические и электрические параметры светодиодных ламп с интегрированным преобразователем тока для замены U-образного типа КЛЛ приведены в стандарте безопасности KC10025. Однако, как показано в табл. 1, рекомендуемые значения должны составлять  $\geq 85\%$  от стандартных значений типовой люминесцентной лампы (KS C7601:2004), но не фактическим измеренным данным конкретной заменяемой лампы. Поэтому необходимо провести исследование по определению корректности замены

люминесцентных ламп на светодиодные на основании данных стандартов безопасности [2].

Модернизация существующих осветительных установок с люминесцентными лампами путём установки в светильниках светодиодных ламп может существенно сэкономить время и деньги. Таким образом, по сравнению со случаем, когда необходимо устанавливать новые светильники со светодиодами, общая нагрузка потребления может быть относительно снижена, а существующие люминесцентные лампы могут быть переработаны без их утилизации. Основными преимуществами таких ламп являются



Схема подключения СД ламп прямой замены

| Наименование   | Метод соединения 1 | Метод соединения 2 |
|--|--------------------|--------------------|
| Светильник с люминесцентной лампой / люминесцентная лампы для замены на светодиодную |                    |                    |
| Светодиодная лампа с внешним преобразователем тока                                   |                    |                    |

Таблица 4

Схема подключения СД ламп с внешним преобразователем тока

| Наименование                                    | Светодиодные лампы с внешним преобразователем тока | Примечание          |
|---|--|---------------------|
| Светильник с люминесцентной лампой              |  | -                   |
| Светильник со светодиодной лампой прямой замены |  | Метод подключения 1 |
|   |  | Метод подключения 2 |

высокая эффективность, длительный срок службы и экологичность.

Светодиодные лампы линейного типа подразделяются на:

1. светодиодные лампы для замены ЛЛ 1200 мм мощностью 32–40 Вт;
2. светодиодные лампы с внешним преобразователем тока;
3. светодиодные лампы сменного типа (совместимые с балластом);
4. светодиодные лампы прямой замены.

Среди них первые три типа могут быть сертифицированы через сертификацию КС10025 Национальным институтом технологий и стандартов (*National Institute of Technology and Standards*), а четвертый тип не был сертифицирован из-за отсутствия раздела стандарта безопасности, согласно которому будет проводиться испытание, такого как стандартизация системы питания, когда светодиодная лампа используется с традиционными лампами и люминесцентными лампами, имеющими ту же форму, что и свето-

диодная лампа. В результате из-за отсутствия стандартов сертификации спрос на сертификацию таких изделий стремительно растёт со стороны корейских компаний.

При продаже светодиодных ламп прямой замены ожидается, что могут возникнуть такие проблемы, как пожар, поражение электрическим током и несчастные случаи, связанные с воспламенением, из-за неправильного использования ламп с различными методами питания. Поэтому в настоящей работе будут изучены и проанализированы проблемы традиционных люминесцентных ламп и ожидаемые проблемы фактического использования тех типов ламп, которые представлены в табл. 2. Кроме того, будут установлены стандарты безопасности для электроприборов, чтобы реализовать безопасную и высококачественную продукцию, а потребители соответственно смогли бы пользоваться проверенными безопасными продуктами.

Таким образом, с помощью этого исследования можно выявить проблемы безопасности, которые могут возникнуть, когда светодиодная лампа с интегрированным преобразователем тока, установлена в сеть с традиционной люминесцентной и светильниками, представленными в табл. 2, и обеспечить безопасность, когда они используются вместе, путём стандартизации оптимального метода питания. Кроме того, обычные люминесцентные лампы типа *FPL* в ходе исследования устанавливаются непосредственно в светильник, и мощность, световой поток и освещённость будут измерены и проанализированы для выявления оптимальных светотехнических параметров, на основе которых будут предложены дополнения в стандарты безопасности бытовых электроприборов для замены традиционных ламп.

Подробная схема подключения светодиодной лампы прямой замены представлена на рис. 4.

Перекрёстное сравнение методов подключения ЛЛ и СД ламп для их замены

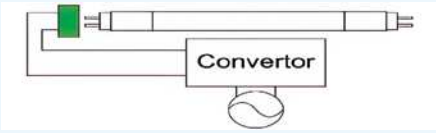
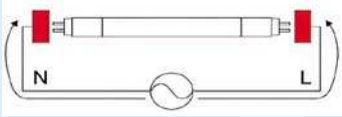
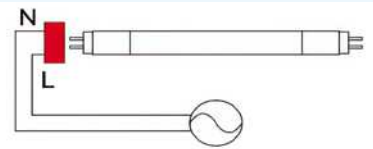
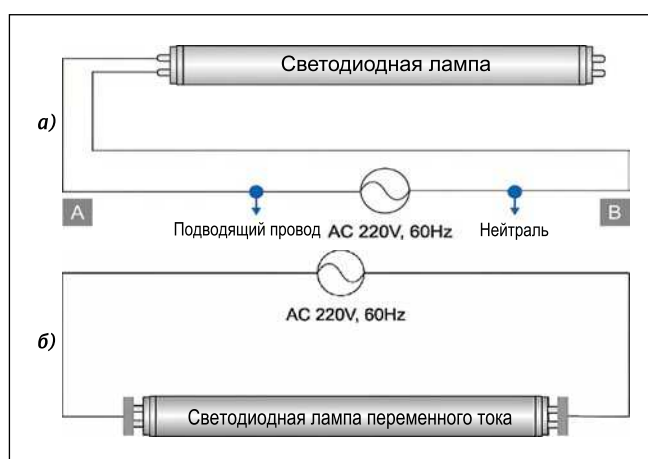
| Наименование  | Люминесцентная лампа   | Светодиодная лампа | Примечания          |
|---|--|--------------------|---------------------|
| Светильник со светодиодной лампой с внешним преобразователем тока |  |                    | –                   |
| Светильник со светодиодной лампой прямой замены                   |   |                    | Метод подключения 1 |
|   |   |                    | Метод подключения 2 |

Таблица 6

Результаты измерений ЛЛ и сертифицированных СД ламп с интегрированным преобразователем тока для их замены

| Параметры                    | Ед. изм. | FPL 36 Вт            |      | FPL 55 Вт          |                      |                    |
|------------------------------|----------|----------------------|------|--------------------|----------------------|--------------------|
|                              |          | Люминесцентная лампа |      | Светодиодная лампа | Люминесцентная лампа | Светодиодная лампа |
|                              |          | А                    | В    |                    |                      |                    |
| Световой поток светильника   | лм       | 5410                 | 5733 | 6558               | 8295                 | 9948               |
| Мощность светильника         | Вт       | 91                   | 101  | 54                 | 159                  | 94                 |
| Световая отдача светильника  | лм/Вт    | 59,5                 | 57,0 | 121,4              | 52,2                 | 105,8              |
| Средняя освещённость на полу | лк       | 150                  | 161  | 215                | 218                  | 319                |

Рис. 4. Схема подключения светодиодной лампы прямой замены в сеть 220 В с интегрированным преобразователем тока при подаче напряжения с одной стороны (а) и включении в замкнутую цепь (б)



## 2. Материалы и методы

В данном исследовании анализируются возможные риски при установке светодиодных ламп прямой замены (питания), которые приведены в табл. 3, и светодиодных ламп с внешним преобразователем тока (табл. 4) в традиционные светильники,

предназначенные для люминесцентных ламп и светодиодных ламп с встроенным преобразователем тока, для исследования безопасности. Кроме того, как показано в табл. 5, анализируются риски при замене существующих люминесцентных ламп на светодиодные, представлены схемы подключения при использовании в од-

ной сети различных комбинаций люминесцентных ламп, светодиодных ламп с интегрированным и внешним преобразователем тока и светодиодных ламп прямой замены. На основе проведённого анализа были выявлены такие проблемы, как совместимость, поражение электрическим током и пожароопасность. Были проанализированы сертифицированные продукты по стандарту КС10025 и была подтверждена возможность использования ИС с регламентируемым значением светового потока согласно табл. 1. Для формирования предложения о внесении изменений в действующие стандарты сравнивались светильники, предназначенные для люминесцентных ламп типа *FPL 36 Вт* и *FPL 55 Вт*, в которые поочерёдно устанавливались люминесцентные и светодиодные лампы.

Кроме того, причина, по которой для испытаний использовался светильник на три лампы типа *FPL*, за-

**Светотехнические и электрические параметры трехцокольного светильника  
с люминесцентными FPL 36 Вт и СД лампами**

| Параметры                    | Ед. изм. | Светильник на три лампы FPL 36 Вт |                    |
|------------------------------|----------|-----------------------------------|--------------------|
|                              |          | Люминесцентная лампа              | Светодиодная лампа |
| Световой поток светильника   | лм       | 5733                              | 4967<br>(1902)     |
| Мощность светильника         | Вт       | 101                               | 42<br>(14)         |
| Световая отдача светильника  | лм/Вт    | 57,0                              | 117,9              |
| Средняя освещённость на полу | лк       | 161                               | 160                |

Таблица 8

**Светотехнические и электрические параметры трехцокольного светильника  
с люминесцентными FPL 55 Вт и СД лампами**

| Параметры                    | Ед. изм. | Светильник на три лампы FPL 55 Вт |                      |
|------------------------------|----------|-----------------------------------|----------------------|
|                              |          | Люминесцентная лампа              | Люминесцентная лампа |
| Световой поток светильника   | лм       | 8295                              | 6898<br>(3217)       |
| Мощность светильника         | Вт       | 159                               | 70<br>(23)           |
| Световая отдача светильника  | лм/Вт    | 52,2                              | 98,8                 |
| Средняя освещённость на полу | лк       | 218                               | 219                  |

ключается в том, что этот тип светильника наиболее распространён в бытовом применении.

Светотехнические и электрические характеристики измерялись согласно приложению В международного стандарта МЭК 60901 «Лампы люминесцентные одноцокольные. Эксплуатационные требования», результаты уровня освещённости анализировались с помощью Гониофотометра (LMT, Германия) в соответствии с приложением А к стандарту KS C 8000 «Общие правила для осветительного оборудования». Метод питания источника света оценивался путём подключения стандартного балласта, указанного в стандарте KS C7601 (люминесцентная лампа), как показано на рис. 5, измерения проводились в тёмной комнате при температуре  $(25 \pm 1) ^\circ\text{C}$ . [3]

### 3. Результаты

Для перекрёстного анализа были проведены исследования безопасно-

сти для двух методов подключения (первый метод и второй метод), результаты измерений в соответствии со стандартами МЭК 60901 и KS C8000 представлены ниже в табл. 6.

Анализ продукции показал, что замена люминесцентной лампы FPL 36 Вт на сертифицированную по KS10025 серийно выпускаемую светодиодную лампу со встроенным преобразователем тока позволяет получить значение освещённости выше на 65 лк при снижении энергопотребления на 47 Вт. Кроме того, в случае

замены люминесцентной лампы FPL 55 Вт на светодиодную уровень освещённости вырос на 101 лк, а энергопотребление снизилось на 65 Вт. На основании этого можно сделать вывод, что световой поток светодиодных ламп превышает регламентируемые значения, указанные в стандарте, следовательно необходимо провести их модификацию.[2]

Результат сравнительного анализа люминесцентной лампы EX-D (дневного света) и светодиодной лампы в трехцокольном светильнике, пред-

Рис. 5. Схема подключения

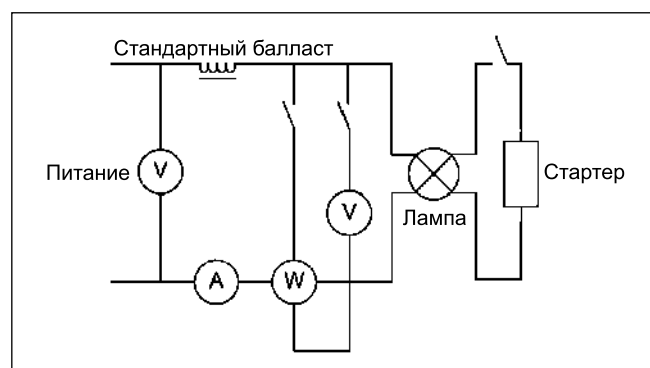


Таблица 9

## Схема подключения

| Подключение         | Схема подключения   |
|---------------------|---|
| Метод подключения 1 | <p>Пример<br/>Питание (1–3), Диммирование (2–4) или<br/>Питание (1–4), Диммирование (2–3)</p> |
| Метод подключения 2 | <p>Пример<br/>Питание (1–2), Диммирование (3–4)</p>   |

назначенном для ламп *FPL* 36 Вт, выглядел следующим образом: каждый источник света включался на одной и той же площади в определённом пространстве, освещённость от люминесцентной лампы и средняя освещённость от светодиодной лампы оценивались в одних и тех же условиях, а световой поток вычислялся и анализировался, как показано в табл. 7.

В результате анализа световой поток светодиодной лампы составил 1902 лм, а мощность – 14 Вт при той же средней освещённости. По сравнению с текущим стандартом 2202 лм, приведённым в табл. 1, он должен быть уменьшен примерно на 300 лм. [4]

Ниже приведены результаты сравнительного анализа люминесцентных ламп *EX-D* (дневного света) и светодиодных ламп в трехцокольном светильнике, предназначенном для ламп *FPL* 55 Вт.

После того как каждый источник света включался в тех же условиях в том же пространстве, что и при фактическом испытании, оценивалась точка, в которой освещённость люминесцентной и светодиодной лампы являются идентичными, а также вычислялся и анализировался рекомендованный световой поток. Результаты приведены в табл. 8.

В результате анализа было установлено, что световой поток светодиодной лампы составил 3217 лм при той же средней освещённости, а мощность составила 23 Вт. По сравнению с дей-

ствующим стандартом значение светового потока должно быть уменьшено 183 лм. [4]

Подробная схема подключения представлена в табл. 9.

Далее были проведены проверки безопасности комбинации люминесцентный светильник и светодиодная лампа прямой замены. В результате перекрёстного анализа люминесцентной лампы и светодиодной лампы прямого питания метод подключения 1 работал хорошо, и никаких проблем с безопасностью обнаружено не было. Однако в случае способа подключения 2 лампа была повреждена и мерцала, что приводило к риску поражения электрическим током и возникновению возгорания.

Проверка безопасности комбинации светильник для светодиодной лампы прямой замены и люминесцентной лампы/светодиодной лампы со встроенным преобразователем тока показала, что в случае метода подключения 1, где использовался светильник для светодиодной лампы прямой замены и люминесцентная лампа, лампа не включалась и никаких проблем с безопасностью не возникло, а после испытания люминесцентные лампы были в рабочем состоянии. Однако в случае метода подключения 2 все люминесцентные лампы были повреждены, что привело к проблемам безопасности и поражения электрическим током. В результате перекрёстного испытания комбинации светодиодной лампы с встроенным преобразователем

тока и светильника для светодиодной лампы прямой замены при методе подключения 1 свет не включился, но также не возникло никаких проблем безопасности в лампе и светильнике, в то время как в случае метода подключения 2 некоторые светодиодные лампы с встроенным преобразователем тока были повреждены, возникла проблема безопасности, а также были выявлены проблемы поражения электрическим током и пожароопасности.

Проверка безопасности комбинации светильника для светодиодной лампы прямой замены и светодиодной лампы с внешним преобразователем тока показала, что в результате перекрёстного испытания комбинации светодиодной лампы прямой замены и светодиодной лампы с внешним преобразователем тока при первом способе подключения свет не включился, а после испытания лампы были нормально включены и никаких дефектов или проблем безопасности обнаружено не было. Однако при способе подключения 2 светодиодная лампа с внешним преобразователем тока была повреждена, образовался дым и была обнаружена проблема безопасности.

Проверка безопасности комбинации светильника для светодиодных ламп с внешним преобразователем тока и светодиодной лампы прямой замены показала, что лампы не включались при обоих способах подключения. Никаких повреждений или проблем с безопасностью обнаружено не было, и лампы включились должным образом после испытания.

#### 4. Заключение

В данном исследовании был проведён сравнительный анализ светодиодных ламп, которые потенциально могут заменить люминесцентные лампы *FPL* 36 Вт и 55 Вт с цоколем *2G11*. Поскольку уровень технологии в то время, когда проводилась существующая сертификация безопасности, сильно отличался от того, что мы имеем в настоящее время, а эффективность светодиодного чипа и драйвера быстро растёт благодаря технологическому развитию компаний смежных отраслей, возникает необходимость пересмотра соответствующих стандартов согласно параметрам современных образцов.

Как представлено в табл. 10, в результате перекрёстного анализа по

Анализ рисков при подключении

|   | СД лампа прямой замены | Совместимая лампа (с встроенным преобразователем тока) | СД лампа с внешним преобразователем тока | Люминесцентная лампа |
|---|------------------------|--|--|----------------------|
| Светильник для прямой замены                            |                        | Риск ↑   | Риск ↑                                   | Риск ↑               |
| Светильник для люминесцентной лампы                     | Риск ↓                 |  | Риск ↓                                   |                      |
| Светильник для СД лампы с внешним преобразователем тока | Риск ↓                 | Риск ↓   |  | Риск ↓               |

Таблица 11

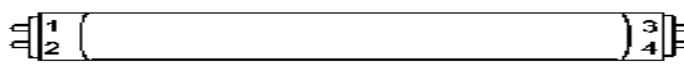
Предложение о внесении изменений в действующие стандарты

| Стандарт                         | Ед. изм. | СД лампа для замены люминесцентной FPL 36 Вт | СД лампа для замены люминесцентной FPL 55 Вт |
|----------------------------------|----------|--|--|
| КС10025                          | лм       | 2202 (85 % согласно KS C7601:2004)           | 3400 (85 % согласно KS C7601:2004)           |
| Предложение о внесении изменений | лм       | 1900 (74 % согласно KS C7601:2004)           | 3200 (80 % согласно KS C7601:2004)           |

Таблица 12 СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ:

## Способ подключения СД лампы прямой замены

| Двухштырьковая СД лампа |               | Цоколь  |
|-------------------------|---------------|---------|
| Питание                 | Диммирование  |         |
| 1, 2 или 1, 4           | 2, 4 или 2, 3 | G13, G5 |
| 2, 3 или 2, 4           | 1, 4 или 1, 3 |         |



методу подключения 2 светодиодной лампы прямой замены, светодиодной лампы с встроенным преобразователем тока, светодиодной лампы с внешним преобразователем тока и люминесцентной лампы все лампы были повреждены, и возникли серьезные проблемы безопасности. С другой стороны, светодиодная лампа прямой замены при способе подключения 1 может обеспечить безопасность без каких-либо проблем, таких как пожар, поражение электрическим током, ожоги даже при использовании с различными осветительными приборами и лампами. Кроме того, чтобы предотвратить снижение энергоэффективности из-за чрезмерно светового потока, необходимо пересмотреть соответствующие стандарты в сторону снижения до достаточного и необходимого уровня регламентируемых

параметров. Рекомендуемые значения этих параметров представлены в табл. 11.

Другими словами, необходимо пересмотреть соответствующие стандарты для использования безопасных продуктов, и предлагаемый способ подключения, который представлен в табл. 12.

В будущем потребуются дальнейшие исследования для оценки безопасности и эффективности светодиодной лампы прямой замены.

*Это исследование финансировалось и поддерживалось Министерством торговли в рамках проекта повышения потенциала сертификации безопасности промышленности и энергетики (создание фонда технологий безопасности потребительских товаров).*

1. IEC60901: Single-capped fluorescent lamps – Performance specifications. 2011.
2. KS10025: LED Lamp for Fluorescent Lamp Retrofit – Internal converter type. 2014.
3. Go JJ, Kim CH. A Study on the Optical Characteristics of LED Lamp as Alternative Type of FPL Lamp. // Journal of the Korean Institute of Illuminating and Electrical Installation Engineers. 2015; V29, #10
4. KS C7601: Fluorescent lamps for general lighting service. 2009.



**Цзинь-Тай Ким (Jin-Tai Kim), Ph.D.** Получил степень доктора наук в области плазменного биодисплея в Университете Квангвун. Директор Института исследований электротехники и электроники Корейского испытательного и научно-исследовательского института, эксперт в корейской лабораторий по системам аккредитации (KOLAS), технический эксперт IECCE



**Чон Хен Ким (Chung-hyeok Kim).** Профессор инженерного колледжа университета Квангвун, член совета корейского института инженеров по электротехнике и электронным материалам

BL  
Group



Международная  
светотехническая  
корпорация



БООС ЛАЙТИНГ ГРУПП



Россия, г. Москва, проспект Мира, 106  
bl-g.ru  
+7 (495) 785-20-95

# СВЕТЛЫЕ РЕШЕНИЯ ДЛЯ УМНОГО ГОРОДА



Интеграция решений для наружного  
и внутреннего освещения в  
информационно-коммуникационные системы,  
цифровые платформы и сервисы

# Влияние рассеянного излучения на возможности наведения по лазерному пучку

\*Г.А. КАЛОШИН<sup>1</sup>, В.П. БУДАК<sup>2</sup>, \*\*С.А. ШИШКИН<sup>1</sup>, В.В. ЖУКОВ<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Институт оптики атмосферы им. В.Е. Зуева СО РАН, Томск

<sup>2</sup>ФГБОУ ВО «НИУ «МЭИ», Москва

<sup>3</sup>АО «НИИ «ЭКРАН», Самара

E-mail: gkaloshin@iao.ru\*, shishkin\_s@mail.ru\*\*

## Аннотация

Обсуждаются возможности дистанционного обнаружения непрерывного лазерного пучка, распространяющегося в рассеивающей континентальной и прибрежной атмосфере, при его регистрации во вне осевой зоны. В приближении однократного рассеяния проведены оценки энергетической яркости пучка в месте регистрации, которые сопоставляются с пороговыми характеристиками существующих фотоприёмников в видимой и ИК областях спектра. Показано, что пучок лазерного излучения надёжно регистрируется в диапазоне углов рассеяния (0–180)° при метеорологической дальности видимости (5–20) км в ночных условиях. В сумерках при тех же условиях возможности обнаружения существенно снижаются.

Экспериментально показано (в полевых условиях) значительное увеличение контраста энергетической яркости пучка лазерного излучения при уменьшении его расходимости. В условиях сумерек наблюдается снижение контраста энергетической яркости пучков. Пучки с расходимостью в 2' и 4' перестают быть различимыми при углах рассеяния (80–90)° и (60–70)° соответственно. При этом разница контрастов достигает 10 крат.

**Ключевые слова:** аэрозольное рассеяние, индикатриса, контраст, лазерное излучение, лазерный пучок, фотометр, континентальная и прибрежная атмосфера.

## Введение

Многие приложения в зондировании, связи и наблюдениях осуществляются активными и пассивными оптико-локационными станциями (ОЛС). В них используются относительно мощные источники лазерного излучения (ЛИ), которые имеют дальность распространения в несколько километров в самой динамичной части атмосферы – приземном слое воздуха. При этом желательно знать местоположение и направление пучка ЛИ. В работах [1–5] показано, что ЛИ обнаружимы из-за рассеяния аэрозолями, а пучок может отображаться с помощью подходящих фотоприёмных устройств (ФПУ). Из этих работ следует, что интенсивность рассеяния ЛИ примерно соответствует прогнозу, основанному на рассеянии Ми [6–9] для прибрежного и континентального аэрозолей. Известно, что концентрация аэрозоля широко варьируется в зависимости от региональных и местных погодных условий [10–13]. Так, повышенная влажность повышает концентрацию аэрозолей и, как правило, рассеяние ЛИ [14–18]. В типичных условиях (дымка, слабый туман и др.) даже на малой высоте рассеяние слабое и труднообнаружимое при наличии фона. Это накладывает особые требования,

с одной стороны, к характеристикам ФПУ: чувствительности, быстродействию и области спектральной чувствительности, а с другой, к информации об оптических свойствах атмосферы и, прежде всего, аэрозоля как основного компонента, влияющего на ослабление и рассеяние ЛИ в «окнах прозрачности» атмосферы [19, 20]. Несмотря на наличие разнообразных методик прогноза вариаций сигнала на входном зрачке ОЛС, существует необходимость дальнейшего совершенствования имеющихся методов и подходов и разработки новых методов дистанционного обнаружения ЛИ в реальных условиях эксплуатации. Это обусловлено как развитием источников ЛИ и ФПУ [21–23], так и улучшением аэрозольных моделей приземной атмосферы [24–27].

Основные задачи данной работы – количественное изучение возможностей внеосевого обнаружения ЛИ и измерение контраста энергетической яркости (ЭЯ) ЛИ, в том числе при проведении измерений в полевых условиях.

Цель работы – изучение взаимосвязей аэрозольного рассеяния при оценках возможностей внеосевого обнаружения ЛИ в континентальных и прибрежных условиях при изменении параметров пучка, метеорологической дальности видимости (МДВ), времени суток и расстояний до источника ЛИ.

Работа включала теоретические оценки однократно рассеянного излучения на основе аэрозольной модели «MaexPro» [28, 29] и расчётов с использованием программ [30–33], а также экспериментальные оценки ЭЯ рассеянного ЛИ в полевых условиях [34].

## 1. Результаты расчётов

В качестве основной величины, обеспечивающей конкретную оценку возможностей внеосевого обнаружения лазерного пучка, выбрана ЭЯ рассеянного ЛИ в приземной атмосфере. Современные фотометры (спектрорадиометры) позволяют уверенно обнаруживать сверхслабые сигналы кремниевыми неохлаждаемыми фотодиодными приёмниками в спектральном диапазоне 0,35–1,1 мкм и фотоумножителями в спектральном диапазоне 0,35–0,93 мкм при порогах чувствительности на уровне  $3\sigma$  (коэффициент запаса равен 6)  $3 \cdot 10^{-10}$  и  $3 \cdot 10^{-14}$  Вт/нм соответственно. Данные спектрорадиометры производства компании *Instrument Systems* [35] в спектральном диапазоне 0,2–5 мкм имеют пороговую чувствительность  $10^{-6} - 10^{-7}$  лк и предел контрастности до  $10^6:1$ , что позволяет регистрировать фон безлунного звёздного неба, в  $3 \cdot 10^{-4}$  лк, или, например, свет от Сириуса, в  $10^{-5}$  лк. Для охлаждаемых фотоумножителей в спектральном диапазоне 0,35–0,93 мкм с GaAs-фотокатодом эквивалентная мощность шума



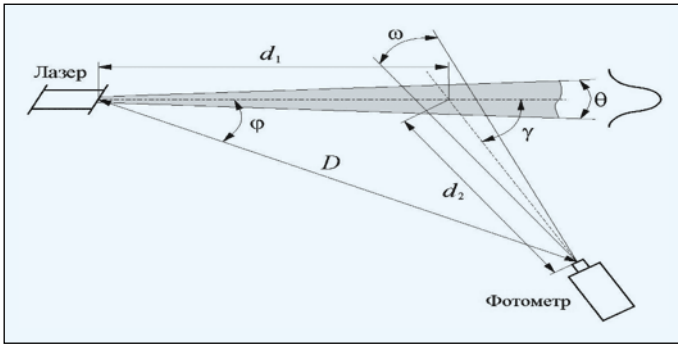


Рис. 1. Схема приёма рассеянного лазерного излучения

равна  $10^{-13}$  Вт/(см<sup>2</sup>·ср·нм), или чувствительность по яркости – порядка  $10^{-3}$  кд/м<sup>2</sup>.

В работе рассматривается модель внеосевого рассеяния ЛИ для оптимизации характеристик приёмника и прогнозирования эффективности его работы в прибрежных районах при перемещении оптической оси ФПУ перпендикулярно и вдоль оси пучка на горизонтальной трассе в ночных и сумеречных условиях при разной МДВ.

Схема численного эксперимента для определения дальности внеосевого обнаружения непрерывного ЛИ, проходящего через рассеивающую среду, показана на рис. 1. Гауссов пучок ЛИ с длиной волны  $\lambda$ , начальной мощностью  $P_0$  и расходимостью  $\theta$  по уровню 0,5 направлен горизонтально к поверхности Земли в направлении  $\varphi$  относительно ФПУ. На расстоянии  $D$  от источника ЛИ расположено ФПУ с углом зрения  $\omega$ . Рассеянное ЛИ наблюдается под углом  $\gamma$ .

Под дальностью внеосевого обнаружения понимаются расстояния  $D$  и  $d_2$ , при которых для ЭЯ рассеянного в направлении ФПУ ЛИ  $L$  выполняется условие  $L/L_n \geq 1$ , где  $L_n$  – пороговая ЭЯ для конкретного ФПУ.

Расчёт  $L$  проводился в приближении однократного рассеяния, что оправдано для небольших оптических толщин при решении атмосферных задач [17]. При этом считалось, что молекулярное рассеяние мало.

$L$  (в Вт/(м<sup>2</sup>·ср) в месте пересечения с осью поля зрения ФПУ рассчитывалась как

$$L = \frac{10^{-3}}{4\pi} \frac{\chi(\gamma) \exp[-\sigma(\lambda)d_2 \cdot 10^{-3}]}{\sin \gamma} \int_{-R}^R E(r) dr, \quad (1)$$

где  $\sigma(\lambda)$  – спектральный коэффициент аэрозольного рассеяния, км<sup>-1</sup>;  $\lambda$  – длина волны ЛИ, мкм;  $\chi(\gamma)$  – аэрозольный коэффициент направленного светорассеяния, км<sup>-1</sup>·ср<sup>-1</sup>;  $\gamma$  – угол рассеяния;  $d_2$  – расстояние от ФПУ до визируемой точки на оси пучка, м;  $E(r)$  – облучённость, которую лазерный пучок создаёт в данной точке, Вт/м<sup>2</sup>;  $r$  – радиус пучка в плоскости визируемой точки, м.

$E(r)$  определялась по формуле

$$E(r) = \frac{2P_0}{\pi r^2} \exp(-\sigma(\lambda)d_1 \cdot 10^{-3}) \exp\left(-2\frac{r^2}{r_0^2}\right), \quad (2)$$

где  $P_0$  – мощность ЛИ на входе в среду, Вт;  $d_1$  – расстояние от лазера до визируемой точки, м;  $r_0 = r_0 + d_1 \tan(\theta/2)$  – радиус пучка на уровне расходимости  $\theta$  в плоскости визируемой точки, м;  $r_0$  – радиус пучка на выходе апертуры, м;  $\theta$  – расходимость пучка по уровню 0,5, рад;  $R = d_2 \tan(\omega/2)$  – расстояние поперёк пучка, ограниченное полем зрения ФПУ;  $\omega$  – угол поля зрения ФПУ, град.

По уравнениям (1) и (2) были рассчитаны  $L$  для прибрежной дымки с МДВ  $S_m$  в 5 и 20 км при разной геометрии схемы приёма ( $D$ ,  $\varphi$ ) и углах рассеяния  $\gamma$  от 0 до 180°. Полученные значения сравнивались с пороговой чувствительностью по ЭЯ выбранных ФПУ (для оценки дальности внеосевого обнаружения). Были приняты следующие значения параметров пучка ЛИ:  $P_0 = 1$  Вт;  $\lambda = 0,52$  и 1,06 мкм;  $\theta = 3'$ ;  $r_0 = 2$  мм. Коэффициенты  $\sigma(\lambda)$  и  $\chi(\gamma)$  рассчитывались по данным модели «MaexPro» [28, 29]. Так, при  $\lambda = 0,52$  мкм и  $S_m = 5$  и 20 км  $\sigma = 0,83$  и 0,75 км<sup>-1</sup> соответственно, а при  $\lambda = 1,06$  мкм, соответственно, 0,21 и 0,11 км<sup>-1</sup>. Выборочные значения коэффициентов  $\chi(\gamma)$  (при  $\gamma = 1, 3, 5, 45, 90$  и 135°) приведены в таблице.

Пороговая чувствительность ФПУ была выбрана по данным [35] с учётом перевода энергетических величин в световые через относительную спектральную световую эффективность  $V(\lambda)$  при  $\lambda = 0,52$  мкм. Значения  $L_n$  при  $\lambda = 0,52$  мкм для ночных и сумеречных условий составляли  $10^{-7}$  и  $10^{-4}$  Вт/(м<sup>2</sup>·ср) соответственно, а при  $\lambda = 1,06$  мкм, соответственно  $10^{-9}$  и  $10^{-6}$  Вт/(м<sup>2</sup>·ср). При этом угол  $\omega$  составлял 0,3 град.

В качестве примера на рис. 2 и 3 приведены результаты расчёта  $L$  в зависимости от  $\gamma$  в видимом ( $\lambda = 0,52$  мкм) и ближнем ИК ( $\lambda = 1,06$  мкм) диапазонах спектра при ска-

Рис. 2. Изменение энергетической яркости лазерного пучка  $L$  на  $\lambda = 0,52$  мкм при  $P_0 = 1$  Вт и  $\theta = 3'$  в зависимости от угла рассеяния  $\gamma$  при сканировании оси поля зрения ФПУ вдоль оси пучка при разных дистанциях  $D$  от излучателя при  $S_m = 5$  км (а) и 20 км (б)

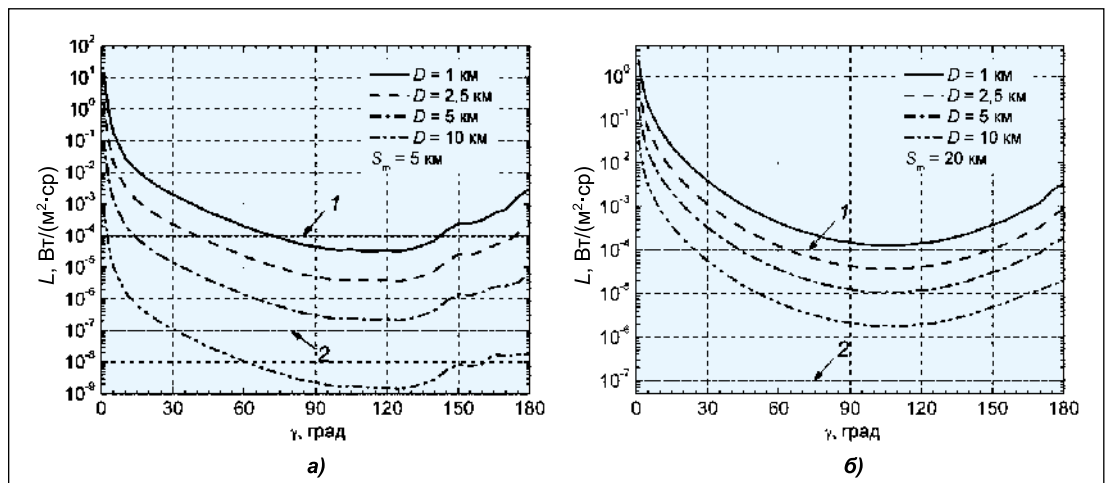
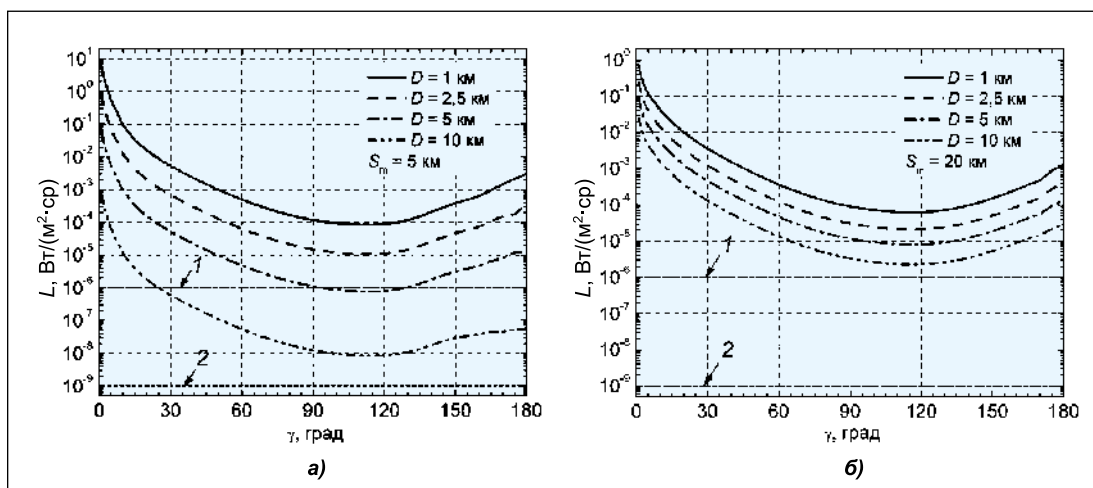


Рис. 3. Изменение энергетической яркости лазерного пучка  $L$  на  $\lambda = 1,06$  мкм при  $P_0 = 1$  Вт и  $\theta = 3'$  в зависимости от угла рассеяния  $\gamma$  при сканировании оси поля зрения ФПУ вдоль оси пучка при разных дистанциях  $D$  от излучателя при  $S_m = 5$  км (а) и 20 км (б)



нировании оси ФПУ вдоль оси пучка при  $S_m = 5$  и 20 км и разных значениях  $D$ .

Расчёты показывают, что возможности обнаружения рассеянного ЛИ в видимом диапазоне существенно выше, чем в ближнем ИК при всех  $\gamma$ . Это объясняется большей эффективностью рассеяния на частицах атмосферной дымки (частицах Ми) на более коротких  $\lambda$ .

Уровни  $L_n$  на рис. 2 и 3 обозначены линиями 1 и 2 для ночных и сумеречных условий соответственно. Из рисунков видно, что в ночных условиях при  $S_m = 5$  км пучок ЛИ будет обнаруживаться на дистанции  $D = 10$  км при  $\gamma = 45^\circ$ . При  $\gamma = 110-120^\circ$  (минимальные значения  $L$ ) дальность обнаружения  $D$  при  $S_m = 5$  км снижается до 5 км, в то время как при  $S_m = 20$  км пучок ЛИ уверенно обнаруживается на  $D$  более 10 км. В сумерках при тех же  $\gamma$  возможности обнаружения существенно снижаются, до  $D \approx 1$  км, как при  $S_m = 5$ , так и в 20 км.

## 2. Результаты полевых измерений

Для подтверждения результатов расчётов были проведены полевые измерения в ночных и сумеречных условиях на полигоне Института оптики атмосферы им. В.Е. Зуева СО РАН в августе 2015–2018 гг. ЭЯ фона  $L_f$  при этом составляли  $10^{-2}$  кд/м<sup>2</sup> (ночь) и 0,5 кд/м<sup>2</sup> (сумерки) соответственно. Во время измерений присутствовала облачность и луна находилась за горизонтом. МДВ изменялась в пределах 12–15 км.

## 2.1. Схема экспериментальной установки

Макет излучателя состоял (рис. 4) из полупроводникового лазера типа *DTL-313* ( $\lambda = 0,527$  мкм,  $P_0 = 117$  мВт,  $\theta = 1$  мрад,  $d_0 = 2$  мм) и телескопической системы коллимации пучков для регулировки  $\theta$ . Для измерения  $L$  использовалось ФПУ компании *Konica Minolta* типа *LS-110* (диапазон измерений по яркости 0,01–999900 кд/м<sup>2</sup>,  $\omega = 1/3^\circ$ ) совместно с фотоаппаратом *Canon EOS6D* (разрешение 20 Мрх (мегапикселей), объектив EF (24–105) mm,  $f/4L$ ). Оборудование располагалось на поворотной платформе для перемещения по азимуту и углу места. Данные измерений заносились в компьютер (ПК) и обрабатывались с помощью разработанных программ [36, 37].

Измерения проводились по схеме, приведённой на рис. 1. Коэффициент направленного светорассеяния  $\gamma$  регистрировался в диапазоне углов  $\gamma = 0,5-179,5^\circ$  с шагом  $5^\circ$  при заданных  $D$  и  $\varphi$ . При этом в силу конструктивных особенностей ФПУ не достигал граничных значений  $\gamma$  (0 и  $180^\circ$ ) на  $0,5^\circ$ . Пучок проходил на высоте около 2 м над поверхностью Земли. Перед началом измерений проводилась стандартная геодезическая разметка местности для определения параметров трассы распространения ЛИ и определения места установки ФПУ таким образом, чтобы их оптические оси лежали в одной плоскости и пересекались.

Структура лазерных пучков, которые использовались в измерениях, показана на рис. 5.

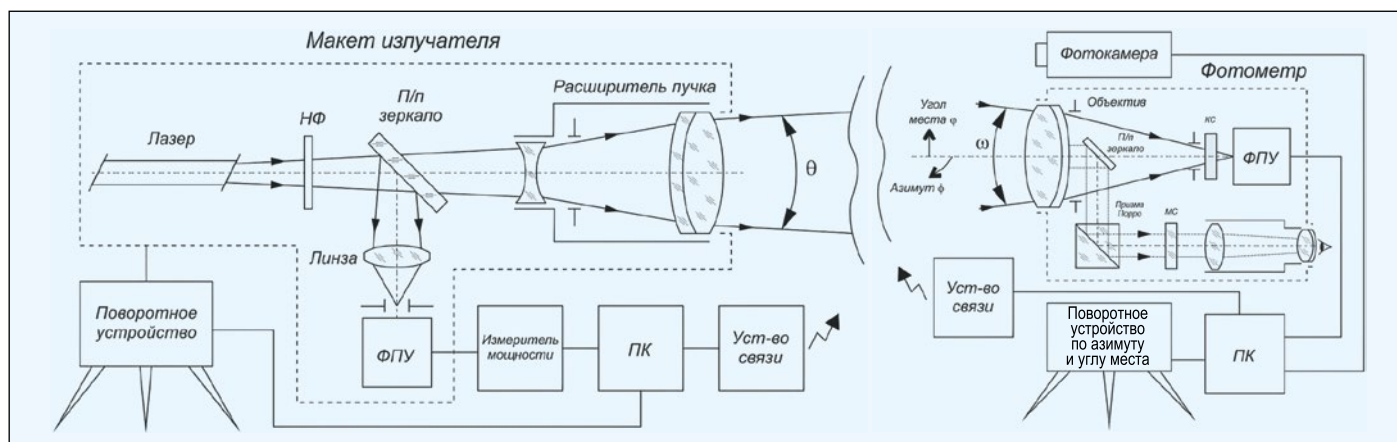


Рис. 4. Схема экспериментальной установки для измерения яркости рассеянного лазерного излучения

Рис. 5. Распределение яркости в поперечном сечении пучков лазерного излучения в виде 4 и 12 концентрических колец (фото 1 и 3 соответственно) и результаты фотометрирования этих же пучков (2 и 4)

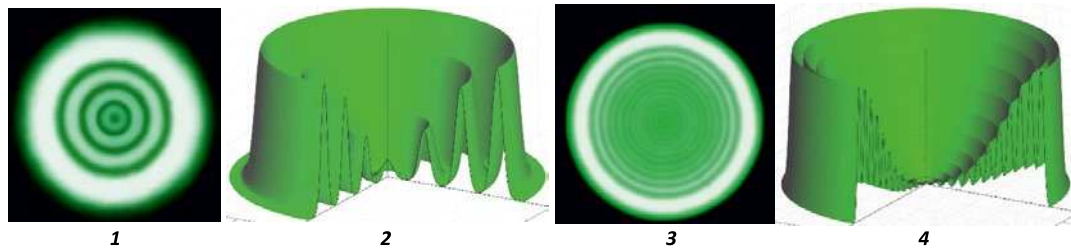


Рис. 6. Изображение пучков лазерного излучения ( $\lambda = 0,527$  мкм,  $P_0 = 117$  мВт), вид сбоку, на призмной трассе при расходимости пучка  $\theta = 2'$  (а) и  $4'$  (б)

В последнее время вызывают интерес пучки ЛИ с кольцевой структурой распределение интенсивности, которая в поперечном сечении хорошо аппроксимируется функцией Гаусса. Из рис. 5 видно, что наружное кольцо обоих видов пучков имеет наибольшую яркость, которая спадает к центру пучка по закону, близкому к гауссову распределению. Основная мощность пучка сосредоточена в первых двух кольцах. На рис. 5 белый цвет соответствует максимальной интенсивности, а чёрный – нулевой интенсивности. Здесь распределение интенсивности в поперечном сечении пучков представлено в виде 4 и 12 концентрических колец с  $\theta = 2$  и  $4'$  соответственно.

Пример изображения пучков при фотографировании сбоку показан на рис. 6. При этом геометрия схемы приёма была следующей:  $D = 150$  м,  $\varphi = 2^\circ$ ,  $\gamma = 45^\circ$ .

## 2.2. Результаты измерений контраста яркости пучков ЛИ

Измеренная яркость пучков ЛИ в направлении, перпендикулярном их оси показана на рис. 7 при двух значениях угловых направлений приёма  $\gamma = 45$  и  $90^\circ$ . На снимке пучков ЛИ (рис. 6) ось приёмника располагалась примерно в середине изображения на оси соответствующего пучка.

Возможность наведения по пучку ЛИ оценивалась по величине яркостного контраста  $k$ , определяемого по выражению

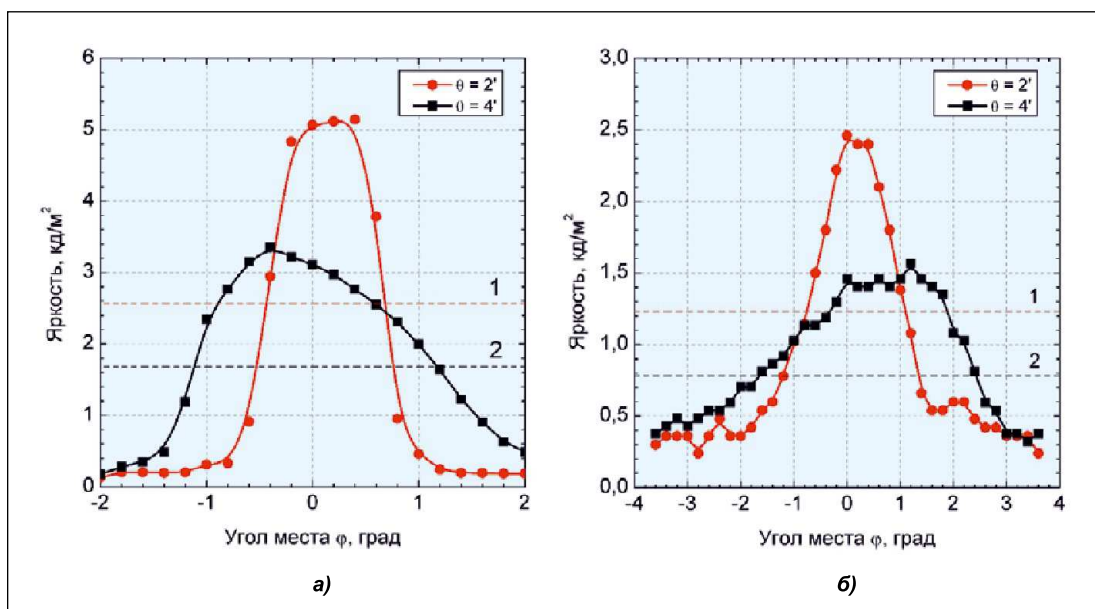
$$k = (L_0 - L_\phi) / L_\phi, \quad (3)$$

где  $L_0$  – яркость рассеянного пучка ЛИ;  $L_\phi$  – яркость фона. При  $k \rightarrow 1$  пучок ЛИ наблюдается предельно контрастно, а случай  $k \rightarrow 0$  соответствует полному рассеянию пучка ЛИ. Для определения  $k$  пучка ЛИ значение яркости пучка  $L_0$  было выбрано на уровне  $0,5 \cdot L_{\max}$ , показанном на рис. 7 горизонтальными линиями 1 (при  $\theta = 2'$ ) и 2 (при  $\theta = 4'$ ). При  $\gamma = 45^\circ$  рассчитанные по (3) значения  $k$  составили 0,51 и 0,33 для пучков ЛИ с  $\theta = 2$  и  $4'$  соответственно. При  $\gamma = 90^\circ$   $k = 0,33$  для пучка ЛИ с  $\theta = 2'$  и  $k = 0,12$  для пучка ЛИ с  $\theta = 4'$ . Таким образом, рис. 7 иллюстрирует значительное снижение  $k$  пучка при увеличении  $\theta$ .

Для оценки возможностей обнаружения пучков ЛИ были проведены несколько серий измерений  $k$  пучка при разных  $\gamma$  в зависимости от фоновых условий наблюдения. Измеренная при этом яркость фона  $L_\phi$  составляла порядка  $10^{-2}$  и  $0,5$  кд/м<sup>2</sup> для ночных и сумеречных условий соответственно. При этом выбранная схема приёма была следующей:  $D = 1200$  м,  $\varphi = 5^\circ$ ,  $\gamma = 5-135^\circ$ .

Изменение  $k$  пучков ЛИ с  $\theta = 2$  и  $4'$  показано на рис. 8. Горизонтальной линией здесь обозначен уровень порогового яркостного контраста  $k_{\text{п}}$ , выбранный равным 0,02, согласно рекомендациям [38, 39] для приближённых вычислений.

Рис. 7. Изменение яркости пучков лазерного излучения ( $\lambda = 0,527$  мкм,  $P_0 = 117$  мВт) с расходимостью  $\theta = 2'$  и  $4'$  при перемещении оси поля зрения фотометра перпендикулярно оси пучка при углах приёма  $\gamma = 45^\circ$  (а) и  $90^\circ$  (б)



Значения (выборочные) коэффициентов  $\chi(\gamma)$ , принятые для расчёта

| $S_m$ , км | $\lambda$ ЛИ, мкм | $\chi(\gamma)$ , км <sup>-1</sup> ·ср <sup>-1</sup> |                    |                    |                     |                     |                      |
|------------|-------------------|---|--------------------|--------------------|---------------------|---------------------|----------------------|
|            |                   | $\gamma = 1^\circ$                                  | $\gamma = 3^\circ$ | $\gamma = 5^\circ$ | $\gamma = 45^\circ$ | $\gamma = 90^\circ$ | $\gamma = 135^\circ$ |
| 5          | 0,52              | 20  | 3,7                | 1,2                | 0,032               | 0,0038              | 0,0029               |
|            | 1,06              | 8,1   | 6,2                | 3,8                | 0,087               | 0,0098              | 0,0092               |
| 20         | 0,52              | 6,7   | 4,5                | 3,0                | 0,13                | 0,026               | 0,025                |
|            | 1,06              | 3,5   | 3,3                | 3,0                | 0,22                | 0,027               | 0,017                |

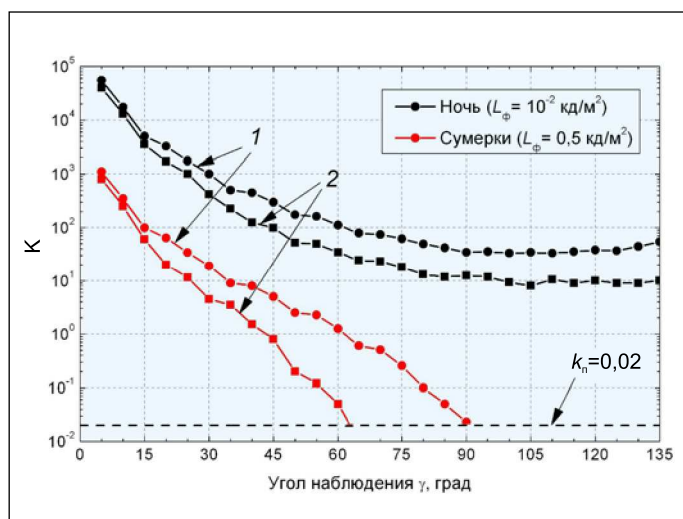


Рис. 8. Изменение яркостного контраста  $k$  лазерного пучка ( $\lambda = 0,527$  мкм,  $P_0 = 117$  мВт) с расходимостью  $\theta = 2'$  (кривые 1) и  $4'$  (кривые 2) для ночных и сумеречных условий при углом перемещения оси поля зрения фотометра вдоль оси пучка

### 3. Обсуждения полученных результатов

Результаты показывают (рис. 7), что с ростом  $\theta$  наблюдается существенное уменьшение  $k$  пучков ЛИ. Это связано с увеличением фона от многократного рассеяния самого пучка. Кроме того, из рис. 8 следует, что  $k$  пучков ЛИ в ночных условиях существенно выше  $k_n$  во всём диапазоне углов  $\gamma$ , что говорит об их надёжной идентификации. Особенно контрастными являются начальные участки пучков, вплоть до углов  $\gamma = 15\text{--}20^\circ$ , которые у обоих пучков также зрительно воспринимались одинаковыми. С увеличением углов  $\gamma$  более контрастно наблюдался пучок с  $\theta = 2'$ , причём его  $k$  был почти в 3–5 раз больше, чем у пучка с  $\theta = 4'$ .

В условиях сумерек наблюдается существенное снижение  $k$  обоих пучков. Пучок с  $\theta = 2'$  перестаёт быть различимым при  $\gamma = 80\text{--}90^\circ$ , а пучок с  $\theta = 4'$  при  $\gamma = 60\text{--}70^\circ$ . При этом разница  $k$  достигает 10 крат.

### 4. Выводы

Результаты расчётов и полевых измерений показывают, что для выбранных типов пучков ЛИ наблюдается сильная зависимость их  $k$  от  $\theta$  и  $S_m$ .

Показано, что ЛИ надёжно регистрируется в диапазоне углов  $\gamma = 0\text{--}180^\circ$  при  $S_m = 5\text{--}20$  км в ночных и суме-

речных условиях при яркостях фона  $10^{-2}$  и  $0,5$  кд/м<sup>2</sup> соответственно.

Экспериментально в полевых условиях показано существенное увеличение  $k$  пучка ЛИ при уменьшении его  $\theta$ . В условиях сумерек наблюдается существенное снижение  $k$  обоих пучков. Пучок с  $\theta = 2'$  перестаёт быть различимым при  $\gamma = 80\text{--}90^\circ$ , а пучок с  $\theta = 4'$  при  $\gamma = 60\text{--}70^\circ$ . При этом разница  $k$  достигает 10 крат.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Roy N., Reid F. Off-axis laser detection model in coastal areas // Optical Engineering. – 2008. – Vol. 47. – P. 1–11.
2. Cariou J.P. Off-axis detection of pulsed laser beams: simulation and measurements in the lower atmosphere // Proceedings of SPIE. – 2003. – Vol. 5086. – P. 129–138.
3. Michulec J.K., Schleijsen R. Influence of aerosols on off-axis laser detection capabilities // Proceedings of SPIE. – 2009. – Vol. 7463. – P. 1–12.
4. DeGrassie John S. Modeling off-axis laser scattering: effects from aerosol distributions // Proceedings of SPIE. – 2012. – Vol. 8517 (85170V).
5. Mendoza-Yero O. Effects of off-axis laser beam propagation on beam parameters // Proceedings of SPIE. – 2014. – Vol. 5622.
6. Kaloshin G.A., Piazzola J. Influence of the large aerosol particles on the infrared propagation in coastal areas / Proceedings of 23rd International Laser Radar Conference. – 2006. – P. 429–432.
7. Kaloshin G.A., Piazzola J., Shishkin S. Numerical modeling of influence of meteorological parameters on aerosol extinction in the marine atmospheric surface layer / Proceedings of 16th International Conference on Nucleation and Atmospheric Aerosols (ICNAA). – 2004. – P. 352–354.
8. Kaloshin G.A. Modeling the Aerosol Extinction in Marine and Coastal Areas / IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters. – 2020, april. URL: <https://ieeexplore.ieee.org/document/9052468> (дата обращения: 20.06.2020); doi: 10.1109/LGRS.2020.2980866.
9. Калошин Г.А. Способ построения визуальной взлётно-посадочной системы с помощью вихревых лазерных пучков / Патент России № 2695044. 2018. Бюл. № 32.
10. Gathman S.G. Optical properties of the marine aerosol as predicted by the Navy aerosol model // Optical Engineering. – 1983. – Vol. 22, No. 1. – P. 57–62.
11. Gathman S.G. J. van Eijk A.M. and Cohen L.H. Characterizing large aerosols in the lowest levels of the marine atmosphere // Proceedings of SPIE. – 1998. – Vol. 3433. – P. 41–52.
12. Shettle E.P. Models of aerosols clouds and precipitation for atmospheric propagation studies // Proceedings of AGARD Conference:

Atmospheric Propagation in the UV Visible IR and MM-Wave region and Related Systems Aspects. – 1989. – 454. – P. 15–1 – 15–13.

13. *Weichel H.* (ed.) Laser Beam Propagation in the Atmosphere. – SPIE Bellingham WA. – 28.09.1990.

14. *Зуев В.Е.* Распространение видимых и инфракрасных волн в атмосфере. – М: Советское радио. – 1970. – 496 с.

15. *Зуев В.Е.* Распространение лазерного излучения в атмосфере. – М: Радио и связь 1981. – 288 с.

16. *Зуев В.Е., Креков Г.М.* Оптические модели атмосферы. – Л.: Гидрометеоздат, 1986. – 256 с.

17. *Зуев В.Е., Кабанов М.В., Савельев Б.А.* Распространение лазерных пучков в рассеивающей среде // *Applied Optics*. – 1969. – Vol. 8, No. 1. – P. 137–141.

18. *Деймерджан Д.* Рассеяние электромагнитного излучения сферическими полидисперсными частицами. – М.: Мир, 1971. – 290 с.

19. *Jensen D.R., Gathman S.G., Zeisse C.R., Littfin K.M.* EOPACE overview and initial accomplishment // *Journal of Aerosol Science*. – 1999. – Vol. 30, No. 1. – P. 53–54.

20. *Jensen D.R., Gathman S.G., Zeisse C.R., Leeuw G., de Smith M.H., Frederickson P.A., Davidson K.L.* Electrooptical Propagation Assessment in Coastal Environments (EOPACE): summary and accomplishments // *Optical Engineering*. – 2001. – Vol. 40, No. 8. – P. 1486–1498.

21. *Kaloshin G.A., Gordienko A.I.* Laser aids to navigation (methods) // *IALA Bulletin*. – 2003. – 3. – P. 46–51.

22. *Kaloshin G.A., Gordienko A.I.* Laser aids to navigation (technologies) // *IALA Bulletin*. – 2004. – No. 1. – P. 42–49.

23. *Gordienko A.I., Kaloshin G.A.* Laser leading beacons: summaries and perspectives // *Proceedings of XV Conference IALA «Navigation and the Environment»*, 2002. – P. 150–158.

24. *Jensen D.R., Gathman S.G., Zeisse C.R. and Littfin K.M.* EOPACE (Electrooptical Propagation Assessment in Coastal Environments) Overview and Initial Accomplishments // *Proceedings of Millennium Conference on Antennas and Propagation (AP2000)*. – Davos Switzerland, 2000.

25. *Nilsson B.A.* Meteorological influence on aerosol extinction in the 0.2–40  $\mu$  wavelength range // *Applied Optics*. – 1979. – Vol. 18. – P. 3457–3472.

26. *Nilsson B.A.* Model of the relation of IR aerosol extinction to weather parameters // *Proceedings of SPIE: Infrared Technology XVI-II*. – 1992. – Vol. 1762. – P. 238–250.

27. *Lewis E.R., Schwartz S.E.* Sea salt aerosol production: Mechanisms methods measurements and models – a critical review. *Geophys. Monograph*. – Washington DC: AGU, 2004. – 413 p.

28. *Kaloshin G.A., Grishin I.A.* An aerosol model of the marine and coastal atmospheric surface layer // *Atmosphere – Ocean*. – 2011. – Vol. 49, No. 2. – P. 112–120.

29. *Калошин Г.А.* Развитие аэрозольной модели приземного слоя морской и прибрежной атмосферы. // *Оптика атмосферы и океана*. – 2018. – Т. 31. № 11. – С. 881–887.

30. *Калошин Г.А., Шишкин С.А.* Программно-технологический пакет Range для проведения расчётов распространения оптического излучения с учётом аэрозольного ослабления в приземном слое континентальной морской и прибрежной атмосферы / Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ от 03.08.2012 № 2012616944.

31. *Калошин Г.А., Шишкин С.А.* Программа для расчёта спектральных коэффициентов аэрозольного ослабления в приземном слое морской и прибрежной атмосферы MaexPro / Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ от 03.08.2012 № 2012616945.

32. *Калошин Г.А., Шишкин С.А.* Программа для расчёта комплексных показателей преломления вещества частиц морского и прибрежного аэрозоля MieCalc / Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ от 03.08.2012 № 2012616943.

33. *Калошин Г.А., Шишкин С.А., Жуков В.В.* Микрофизические и оптические характеристики морского и прибрежного аэрозоля / Свидетельство о государственной регистрации базы данных от 14.12.2015 № 2015621775.

34. *Kaloshin G.A., Shishkin S.A., Zhukov V.V.* Characteristics of scattered radiation in off-axis recording of laser radiation under field conditions // *Proceedings of SPIE25th Intern. Symp. on Atmospheric and Ocean Optics: Atmospheric Physics*. – 2019. – Vol. 11208. – P. 112081C.

35. *Instrument Systems*. URL: <http://www.instrument systems.com/> (дата обращения: 20.06.2020).

36. *Калошин Г.А., Шишкин С.А., Жуков В.В.* Программа для управления и обработки данных спектрорадиометрических измерений рассеянного излучения лазерных пучков в атмосфере / Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ от 20.08.2015 № 2015618954.

37. *Калошин Г.А., Шишкин С.А., Жуков В.В.* Программа управления измерениями контраста яркости лазерных пучков в рассеивающих средах / Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ от 14.12.2015 № 2015663204.

38. *Мешков В.В., Матвеев А.Б.* Основы светотехники: Учеб. пособие для вузов: В 2-х ч. Ч. 2. Физиологическая оптика и колориметрия. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Энергоатомиздат 1989. – 432 с.

39. *Луизов А.В.* Глаз и свет. – Л.: Энергоатомиздат, ЛО, 1983. – 144 с.



**Калошин Геннадий Александрович**, кандидат физ.-мат. наук. Окончил в 1972 г. Томский государственный университет по специальности «Радиофизика и квантовая электроника». Ведущий научный сотрудник Института оптики атмосферы им. В.Е. Зуева СО РАН



**Будак Владимир Павлович**, доктор техн. наук, профессор. Окончил в 1981 г. МЭИ. Главный редактор журнала «Светотехника / Light & Engineering» и профессор кафедры «Светотехника» НИУ «МЭИ». Член-корреспондент Академии электротехнических наук РФ



**Шишкин Сергей Александрович**, инженер-конструктор. Окончил в 2000 г. Томский университет систем управления и радиоэлектроники по специальности «проектирование и конструирование радиоэлектронной аппаратуры». Ведущий инженер, заместитель начальника лаборатории АО «НИИ «Экран»



**Жуков Владимир Валентинович**, инженер. Окончил в 1987 г. Томский политехнический институт по специальности «прикладная математика и информатика». Программист в Томском политехническом университете

# Методика определения эффективных режимов воздействия оптического излучения при управлении циркадианной активностью организма человека

А. В. ЛЕОНИДОВ

E-mail: avleonidoff@mail.ru

## Аннотация

Рассмотрены этапы преобразования прямой и рассеянной составляющих солнечного излучения в коротковолновом и длинноволновом спектральных каналах тракта управления циркадианной активностью человека. Разработана методика определения зависимости облучённости от угловой высоты Солнца, а также значений энергетических экспозиций в циркадианной области оптического спектра, необходимых для эффективного управления циркадианной активностью человека. Приведён пример использования разработанной методики. Показано совпадение результатов расчётов по этой методике с результатами независимых экспериментальных исследований. Разработанная методика позволяет сформулировать основные светотехнические требования к характеристикам облучательных установок, управляющих циркадианной активностью человека, предотвращающих и купирующих её нарушения.

**Ключевые слова:** циркадианная активность, угловая высота Солнца, составляющие солнечного излучения, термодинамическая температура, спектральные каналы, эффективная облучённость, энергетическая экспозиция, режимы воздействия, методика расчётов.

## Введение

Ведущий физический фактор, управляющий циркадианной активностью (ЦА) организма человека, – суточные изменения характеристик оптического излучения Солнца, достигшего земной поверхности. Эти изменения характеристик солнечного излучения (СИ) обусловлены текущим положением Земли при её орбитальном движении вокруг Солнца, а также его текущей угловой высотой, характерной для конкретной расчётной точки земной поверхности.

При проведении светотехнических и биологических исследований необходимо иметь сведения о зависимости эффективной<sup>1</sup> облучённости  $E$ , управляющей ЦА организма человека, от угловой высоты Солнца  $h$  в произвольной точке земной поверхности. Эти сведения, а также значения энергетических экспозиций  $H$  в разных расчётных точках земной поверхности необходимы и в проектировании специализированных облучательных установок, предназначенных для предотвращения и купирования нарушений ЦА.

<sup>1</sup> Здесь и далее под «эффективной» понимается мера реакции организма человека на воздействие облучённости и спектральной плотности облучённости, создаваемых СИ в циркадианной области спектра, а также – энергетической экспозиции в соответствующем управлении ЦА диапазоне угловых высот Солнца.

Предотвращение и купирование нарушений ЦА человека создают предпосылки для сохранения психосоматического здоровья и поддержания на необходимом уровне общей и зрительной работоспособности человека, а также обеспечивают поддержание его суточной интеллектуальной активности.

Цель настоящей работы – разработка методики определения эффективных энергетических характеристик солнечного и искусственного излучений, управляющих ЦА организма человека.

## Исходные данные

В качестве модели излучения Солнца использована спектральная плотность энергетической светимости его фотосферы  $m_{es}(\lambda, T)$ , описываемая функцией Планка [1]:

$$m_{es}(\lambda, T) = C_1 \lambda^{-5} \left( \exp \frac{C_2}{\lambda T} - 1 \right)^{-1},$$

где  $\lambda$  – длина волны излучения,  $T$  – термодинамическая температура равновесного излучения чёрного тела,  $C_1 \approx 3,742 \cdot 10^{-16}$  Вт·м<sup>2</sup> и  $C_2 \approx 1,439 \cdot 10^{-2}$  м·К [2].

Спектральная плотность облучённости (СПО), создаваемой СИ при нормальном падении на площадку, расположенную на верхней границе земной атмосферы, выражается как [3]

$$e_{es}(\lambda, T) = \left( \frac{r}{R} \right)^2 m_{es}(\lambda, T), \quad (1)$$

где  $T$  – усреднённая по фотосфере Солнца термодинамическая температура СИ,  $r = 6,96 \cdot 10^5$  км – экваториальный радиус Солнца,  $R = 1,496 \cdot 10^{12}$  км – радиус круговой орбиты Земли [4, 5].

Значение  $T$  в (1) существенно зависит от номера года  $n$  в пределах 11-летнего цикла Швабе [6] солнечной активности и представляется как [3]

$$T(n) = T_{aver} \left[ 1 + 0,027 \sin \left( \frac{2\pi n}{11} - \frac{\pi}{2} \right) \right],$$

где  $T_{aver} = 0,5 \cdot (T_{min} + T_{max})$ ,  $T_{min} \approx 5480$  К,  $T_{max} \approx 5780$  К – значения термодинамической температуры СИ на верхней границе атмосферы, соответствующие минимуму и максимуму солнечной активности,  $0 \leq n \leq 11$ .

В результате распространения СИ в атмосфере на земной поверхности образуются две составляющие излучения: прямая ( $Dir$ ) и рассеянная ( $Diff$ ). Значения термодинамической температуры прямой и рассеянной составляющих СИ в светлый период суток в расчётной точке земной поверхности зависят от угловой высоты Солнца, то есть  $T_{Dir} = T_{Dir}(h, n)$  и  $T_{Diff} = T_{Diff}(h, n)$ .

Функции  $T_{\text{Dir}}(h, n)$  и  $T_{\text{Diff}}(h, n)$  могут быть представлены в виде аппроксимирующих зависимостей

$$T_{\text{Dir(Diff)}}(h, n) \approx T_{\text{Dir(Diff)}}(h) + T(n). \quad (2)$$

Анализ литературы касательно экспериментальных данных по зависимостям  $T_{\text{Dir}}(h, n)$  и  $T_{\text{Diff}}(h, n)$ , в частности [7] и др., а также проведённая аппроксимация этих данных показала, что  $T_{\text{Dir(Diff)}}(h)$  в (2) может быть представлена как

$$T_{\text{Dir(Diff)}}(h) = a_{\text{Dir(Diff)}} \exp(-b_{\text{Dir(Diff)}} h). \quad (3)$$

Спектральные плотности прямой и рассеянной составляющих облучённости на земной поверхности, создаваемые СИ, выражаются как

$$e_{\text{eS,Dir(Diff)}} \left[ \lambda, T_{\text{Dir(Diff)}}(h, n) \right] = \left( \frac{r}{R} \right)^2 \tau_{\text{Dir(Diff)}}(h) C_1 \lambda^{-5} \left( \exp \frac{C_2}{\lambda T_{\text{Dir(Diff)}}(h, n)} - 1 \right)^{-1}, \quad (4)$$

где  $T_{\text{Dir(Diff)}}(h, n)$  – зависимости (2),  $\tau_{\text{Dir(Diff)}}(h)$  – зависимости интегральных коэффициентов пропускания прямой и рассеянной составляющих СИ в спектральном окне прозрачности атмосферы  $300 \leq \lambda \leq 1200$  нм [8] при разных состояниях облачного покрова атмосферы.

Зависимость  $\tau_{\text{Dir(Diff)}}(h)$  в (4) имеет вид [3]

$$\tau_{\text{Dir(Diff)}}(h) = \tau_{\text{Dir(Diff)}}(90^\circ) \times 0,5 \left[ 1 + \sin(d_{\text{Dir(Diff)}} h - g_{\text{Dir(Diff)}}) \right], \quad (5)$$

где  $\tau_{\text{Dir(Diff)}}(90^\circ)$  – интегральные коэффициенты пропускания при нормальном падении СИ на земную поверхность (максимальная угловая высота Солнца  $h = 90^\circ$  реализуется на экваторе в полдень суток весеннего или осеннего равноденствий), коэффициенты  $d_{\text{Dir(Diff)}}$ ,  $g_{\text{Dir(Diff)}}$  для разных составляющих облачного покрова атмосферы приведены в [9].

СПО прямой и рассеянной составляющих СИ на земной поверхности по соотношению (4) принимаются фотоприёмниками сетчатки, характеризующимися функцией относительной спектральной циркадианной эффективности (ФОСЦЭ) вида [10]

$$c(\lambda) = c_1(\lambda) + c_2(\lambda) = \frac{\alpha_1}{\sigma_1 \sqrt{2\pi}} \exp \left[ -\frac{(\lambda - \lambda_{1\text{max}})^2}{2\sigma_1^2} \right] + \frac{\alpha_2}{\sigma_2 \sqrt{2\pi}} \exp \left[ -\frac{(\lambda - \lambda_{2\text{max}})^2}{2\sigma_2^2} \right], \quad (6)$$

полученной при аппроксимации результатов независимых экспериментальных исследований Д. Брейнарда и К. Тапана с сотрудниками, в частности [11–14].

Графики функции (6) и её слагаемых  $c_1(\lambda)$  и  $c_2(\lambda)$  приведены на рис. 1. ФОСЦЭ, полученные Брейнардом и Тапаном, различаются лишь соотношением максимумов функций  $c_1(\lambda)$  и  $c_2(\lambda)$ .

## Полученные результаты

Функции  $c_1(\lambda)$  и  $c_2(\lambda)$  образуют коротковолновый (*SW*) и длинноволновый (*LW*) спектральные каналы тракта управления ЦА [10] и осуществляют спектрально-селективные преобразования СПО СИ (4), описываемые произведениями

$$e_{\text{eS,Dir(Diff),SW(LW)}} \left[ \lambda, T_{\text{Dir(Diff)}}(h, n) \right] c_{1(2)}(\lambda) = \left( \frac{r}{R} \right)^2 \tau_{\text{Dir(Diff)}}(h) C_1 \lambda^{-5} \left( \exp \frac{C_2}{\lambda T_{\text{Dir(Diff)}}(h, n)} - 1 \right)^{-1} \times c_{1(2)}(\lambda) \quad (7)$$

с выделением из широкополосного спектра (4) спектральной области  $350 \leq \lambda \leq 540$  нм при спектральной селекции, осуществляемой только синечувствительными (*B*) колбочками, спектральной области  $450 \leq \lambda \leq 570$  нм при спектральной селекции только палочками и спектральной области  $350 \leq \lambda \leq 570$  нм при совместной спектральной селекции *B*-колбочками и палочками сетчатки. Очевидно, после спектрально-селективной обработки функции (4) функциями  $c_1(\lambda)$ ,  $c_2(\lambda)$ ,  $c_1(\lambda) + c_2(\lambda)$  по соотношению (7) форма полученного спектра определяется исключительно неизменными и независимыми от угловой высоты Солнца спектральными характеристиками этих функций.

Изменение  $T_{\text{Dir(Diff)}}(h, n)$  на земной поверхности при изменении угловой высоты Солнца в светлый период суток приводит не только к изменению спектрального состава СИ (4), но и к смещению максимума спектра (4) по  $\lambda$  в соответствии с законом смещения Вина  $\lambda_{\text{max}} \cdot T(h, n) = C_3 \approx 0,2898 \cdot 10^{-2} \text{ м} \cdot \text{К}$  [2].

Изменение значений  $\lambda_{\text{max}}$  относительно фиксированного по  $\lambda$  положения функций  $c_1(\lambda)$ ,  $c_2(\lambda)$ ,  $c_1(\lambda) + c_2(\lambda)$  при неизменной спектральной форме (7) приводит к зависимости энергетических характеристик (7) от угловой высоты Солнца.

Определение зависимости энергетических характеристик (7) от угловой высоты Солнца основано на использовании двухэтапного преобразования аргументов в (7). На первом этапе осуществляется переход от шкалы  $\lambda$  к шкале  $\lambda_{\text{max}}$ , представляющий собой линейное (тождественное) преобразование аргумента  $\lambda$  в аргумент  $\lambda_{\text{max}}$ . На втором этапе производится нелинейное функциональное преобразование  $\lambda_{\text{max}}$  в угловую высоту Солнца  $h$  с использованием закона смещения Вина, осуществляемое посредством функции, обратной функции (2).

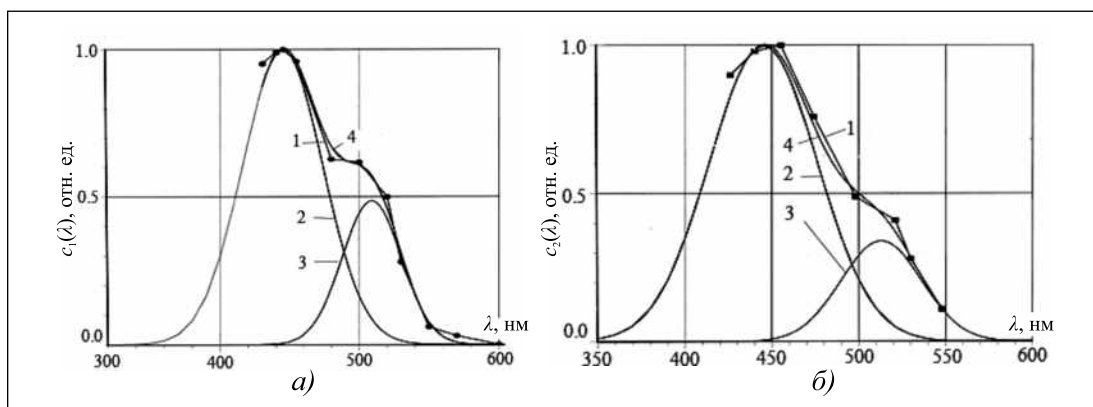
Функциональное преобразование аргументов в (7) осуществляется по известному правилу, например [15, 16]:

$$S(y) = S(x) \left| \frac{dx}{dy} \right| = S[\varphi(y)] \left| \frac{d\varphi(y)}{dy} \right|, \quad (8)$$

где  $x$  – исходный аргумент,  $y$  – новый аргумент,  $x = \varphi(y)$  – функция, обратная исходной функции  $y = f(x)$ .

На первом этапе преобразований аргумента  $\lambda$  в  $\lambda_{\text{max}}$  производится прямая подстановка в (4) аргумента  $\lambda_{\text{max}}$  вместо  $\lambda$ :

Рис. 1. ФОСЦЭ, полученные Брейнардом (а) и Тапаном (б), слагаемые  $c_1(\lambda)$ ,  $c_2(\lambda)$  в соотношении (9) и сумма  $c_1(\lambda) + c_2(\lambda)$ : 1 – результаты экспериментальных исследований [11–14], 2 – функция  $c_1(\lambda)$ , 3 – функция  $c_2(\lambda)$ , 4 – функция  $c_1(\lambda) + c_2(\lambda)$ , аппроксимирующая результаты исследований [11–14]



$$e_{\text{Dir(Diff),SW(LW)}}(\lambda_{\text{max,Dir(Diff)}}, h, n) \cdot c_{1(2)}(\lambda_{\text{max,Dir(Diff)}}) = \left(\frac{r}{R}\right)^2 \tau_{\text{Dir(Diff)}}(h, n) C_1 \lambda_{\text{max,Dir(Diff)}}^{-5} \times \left( \exp \frac{C_2}{\lambda_{\text{max,Dir(Diff)}} T_{\text{Dir(Diff)}}(h, n)} - 1 \right)^{-1} \times \left| \frac{d\lambda}{d\lambda_{\text{max,Dir(Diff)}}} \right| c_{1(2)}(\lambda_{\text{max,Dir(Diff)}}). \quad (9)$$

В соотношении (9) модуль производной  $\left| \frac{d\lambda}{d\lambda_{\text{max,Dir(Diff)}}} \right| = 1$ ,

а само (9) описывает форму спектра, сохраняющую подобие при всех значениях  $h$  и  $n$ , так как его форма определяется исключительно функциями  $c_1(\lambda)$ ,  $c_2(\lambda)$  или  $c_1(\lambda) + c_2(\lambda)$ .

Определение энергетических характеристик зависимости функции  $e_{\text{Dir(Diff),SW(LW)}}(\lambda_{\text{max,Dir(Diff)}}, h, n) \cdot c_{1(2)}(\lambda_{\text{max,Dir(Diff)}})$  от угловой высоты Солнца производится с использованием закона смещения Вина.

Закон Вина при нелинейном функциональном преобразовании  $\lambda_{\text{max}} \rightarrow h$  имеет вид

$$\lambda_{\text{max,Dir(Diff)}}(h, n) = C_3 \left[ T_{\text{Dir(Diff)}}(h) + T(n) \right]^{-1}. \quad (10)$$

При нелинейном преобразовании аргументов  $\lambda_{\text{max}} \rightarrow h$  в соотношении (9) по правилу (8) вместо сомножителей

$$\left| \frac{d\lambda}{d\lambda_{\text{max,Dir(Diff)}}} \right| c_{1(2)}(\lambda_{\text{max,Dir(Diff)}}) \quad \text{вводятся сомножители} \quad \left| \frac{d\lambda_{\text{max,Dir(Diff)}}}{dh} \right| c_{1(2)}(h, n).$$

В остальных сомножителях производится простая подстановка соотношения (10).

Производные  $\left| \frac{d\lambda_{\text{max,Dir(Diff)}}}{dh} \right|$  выражаются как

$$\left| \frac{d\lambda_{\text{max,Dir(Diff)}}}{dh} \right| = C_3 \left| \frac{d \left[ T_{\text{Dir(Diff)}}(h) \right]}{dh} \right| \times \frac{1}{\left[ T_{\text{Dir(Diff)}}(h) + T(n) \right]^2}. \quad (11)$$

После подстановки (10) и (11) в соотношение (9) оно описывает лишь зависимость его формы от значений  $h$  и  $n$  в относительных единицах (*rel*):

$$e_{\text{Dir(Diff),SW(LW)}} \left\{ C_3 \left[ T_{\text{Dir(Diff)}}(h) + T(n) \right]^{-1} \right\} \Big|_{\text{rel}} = \left(\frac{r}{R}\right)^2 \tau_{\text{Dir(Diff)}}(h, n) C_1 C_3^{-5} \left[ T_{\text{Dir(Diff)}}(h) + T(n) \right]^5 \times \left( \exp \frac{C_2}{\left\{ C_3 \left[ T_{\text{Dir(Diff)}}(h) + T(n) \right]^{-1} \right\}} - 1 \right)^{-1} \times C_3 \left| \frac{d \left[ T_{\text{Dir(Diff)}}(h) \right]}{dh} \right| \frac{1}{\left[ T_{\text{Dir(Diff)}}(h) + T(n) \right]^2} c_{1(2)}(h, n). \quad (12)$$

Упрощение выражения (12) приводит его к виду

$$e_{\text{Dir(Diff),SW(LW)}}(h, n) \Big|_{\text{rel}} = e_{\text{Dir(Diff)eS}}(h, n) \left| \frac{dT_{\text{Dir(Diff)}}(h, n)}{dh} \right| c_1(h, n) \Big|_{\text{rel}} = \left(\frac{r}{R}\right)^2 \tau_{\text{Dir(Diff)}}(h, n) C_1 C_3^{-5} \times \left[ T_{\text{Dir(Diff)}}(h) + T(n) \right]^5 \left( \exp \frac{C_2}{C_3} - 1 \right)^{-1} \times C_3 \left| \frac{d \left[ T_{\text{Dir(Diff)}}(h) \right]}{dh} \right| \frac{1}{\left[ T_{\text{Dir(Diff)}}(h) + T(n) \right]^2} c_{1(2)}(h, n). \quad (13)$$



В соотношениях (12) и (13) произведения  $C_3 C_3^{-5}$ ,  $\left[ T_{\text{Dir(Diff)}}(h, n) \right]^5$  и  $\frac{1}{\left[ T_{\text{Dir(Diff)}}(h, n) \right]^2}$  для наглядности остав-

лены без упрощения.

Функция (13) имеет форму, близкую к колоколообразной, с максимумами при разных сочетаниях прямой и рассеянной составляющих СИ с SW- и LW-спектральными каналами, то есть при  $h_{\text{max, Dir(Diff), SW(LW)}}$ .

Введение в (13) в качестве дополнительного сомножителя произведения  $c_{1(2)}(\lambda)$  из (9) позволяет получить зависимости СПО (в относительных единицах) от двух переменных  $-h$  и  $\lambda$  – в виде трёхмерного сигнала управления  $e_{\text{SW(LW)}}(\lambda, h, n)|_{\text{rel}}$  на входе *супраинтенсивных ядер гипоталамуса* (СХЯГ):

$$e_{\text{Dir(Diff), SW(LW)}}(\lambda, h, n)|_{\text{rel}} = \left( \frac{r}{R} \right)^2 \tau_{\text{Dir(Diff)}}(h, n) C_1 C_3^{-5} \left[ T_{\text{Dir(Diff)}}(h) + T(n) \right]^5 \times \left( \exp \frac{C_2}{C_3} - 1 \right)^{-1} \left| \frac{dT_{\text{Dir(Diff)}}(h, n)}{dh} \right| c_{1(2)}(h, n) c_{1(2)}(\lambda). \quad (14)$$

График функции (14) в относительных единицах, как и – функции (13), также имеет колоколообразную форму.

Зависимости абсолютных эффективных значений (13) от текущих значений угловой высоты Солнца при каждом возможном сочетании прямой и рассеянной составляющих СИ с функциями  $c_{1(2)}(h, n)$  определяется с использованием вычисленных значений  $h = h_{\text{max, Dir(Diff), SW(LW)}}$ , соответствующих максимальным значениям (13). После этого проводится нормирование соотношения (13) путём деления его левой и правой частей на значения (13), вычисленные при  $h = h_{\text{max, Dir(Diff), SW(LW)}}$ , то есть определяются функции

$$e_{\text{norm, Dir(Diff), SW(LW)}}(h, n) = \frac{e_{\text{Dir(Diff), SW(LW)}} \left\{ C_3 \left[ T_{\text{Dir(Diff)}}(h) + T(n) \right]^{-1} \right\} |_{\text{rel}}}{e_{\text{Dir(Diff), SW(LW)}} \left\{ C_3 \left[ T_{\text{Dir(Diff)}}(h = h_{\text{max, Dir(Diff), SW(LW)})} + T(n) \right]^{-1} \right\} |_{\text{rel}}}. \quad (15)$$

Для вычисленных значений угловых высот Солнца  $h = h_{\text{max, Dir(Diff), SW(LW)}}$ , соответствующих максимальным значениям соотношения (13), по соотношению (7) определяются зависимости абсолютных значений СПО

$$e_{\text{eS, Dir(Diff), SW(LW)}} \left[ \lambda, T_{\text{Dir(Diff)}}(n, h = h_{\text{max, Dir(Diff), SW(LW)})} \right] c_{1(2)}(\lambda)$$

от  $\lambda$ .

Зависимости абсолютных значений СПО на входе СХЯГ (в 3-мерном представлении) получены с использованием соотношения (7) путём умножения

$$e_{\text{eS, Dir(Diff), SW(LW)}} \left[ \lambda, T_{\text{Dir(Diff)}}(n, h = h_{\text{max, Dir(Diff), SW(LW)})} \right] c_{1(2)}(\lambda)$$

на нормированные функции (15).

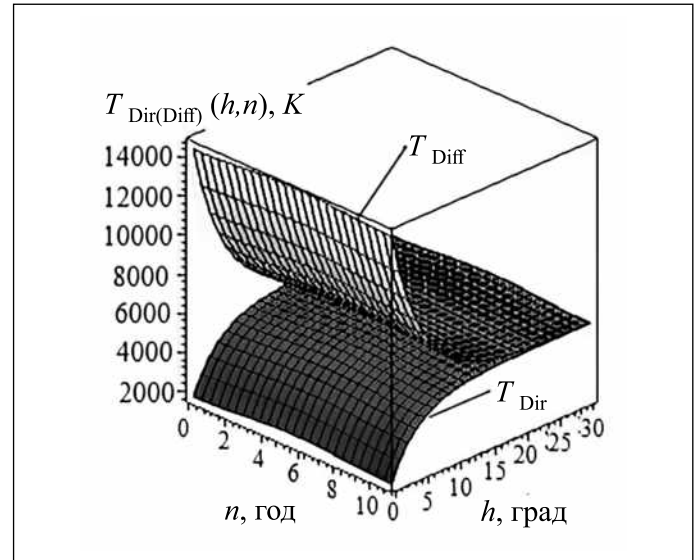


Рис. 2. Графики функций  $T_{\text{Dir}}(h, n)$  и  $T_{\text{Diff}}(h, n)$  в произвольной расчётной точке земной поверхности в 11-летнем цикле солнечной активности

Максимальные значения СПО в абсолютных единицах на выходе СХЯГ (зависящие лишь от значений  $h$ ) получены с использованием (7) из произведения

$$e_{\text{Dir(Diff), SW(LW)}}(\lambda, h) = e_{\text{norm, Dir(Diff), SW(LW)}}(h, n) \times e_{\text{eS, Dir(Diff), SW(LW)}} \left[ \lambda, T_{\text{Dir(Diff)}}(n, h_{\text{max, Dir(Diff), SW(LW)})} \right] c_{1(2)}(\lambda)$$

путём подстановки значений  $\lambda = 445$  и  $505$  нм, соответствующих максимальным значениям функций  $c_1(\lambda)$  и  $c_2(\lambda)$ . Зависимости  $e_{\text{Dir(Diff), SW(LW)}}(h, n)$  на выходе СХЯГ, полученные после указанной подстановки, есть сигналы, непосредственно управляющие суточной активностью эпифиза, секретирующего в плазму крови гормон мелатонин. Суточные вариации концентрации мелатонина в плазме крови приводят в итоге к суточному управлению неосознаваемыми биологическими реакциями, в том числе ЦА человека. ЦА непосредственно влияет на разные характеристики зрительного восприятия, являющиеся основой при построении психической модели Мира в статике и динамике, и управление на этой основе высшими интеллектуальными функциями человека, включая конкретную и абстрактную мыслительную деятельность.

Разработанная методика и произведение соотношений (7) и нормированных функций (15) позволяет получить важные для экспериментальных и теоретических исследований ЦА зависимости облучённости в циркадианной области спектра от угловой высоты Солнца –  $E(h)$ , а также значения энергетической экспозиции  $H$  в диапазоне  $\Delta h = h_{\text{fin}} - h_{\text{init}}$  изменения функции  $E(h)$ , где  $h_{\text{fin}}$  и  $h_{\text{init}}$  – конечная и начальная угловые высоты Солнца.

Облучённость  $E(h)$  представляется в виде

$$E(h) = e_{\text{norm, Dir(Diff), SW(LW)}}(h, n) \times \int_{\lambda_{\text{init}}}^{\lambda_{\text{fin}}} e_{\text{eS, Dir(Diff), SW(LW)}} \left[ \lambda, T_{\text{Dir(Diff)}}(h_{\text{max, Dir(Diff), SW(LW)}, n) \right] \times c_{1(2)}(\lambda) d\lambda, \quad (16)$$

а энергетическая экспозиция в виде

$$H(\Delta h) = \int_{\lambda_{\text{init}}}^{\lambda_{\text{fin}}} \int_{0^\circ}^{90^\circ} e_{eS, \text{Dir}(\text{Diff}), \text{SW}(\text{LW})} \left[ \lambda, T_{\text{Dir}(\text{Diff})}(h_{\text{max}, \text{Dir}(\text{Diff}), \text{SW}(\text{LW}), n}) \right] c_{1(2)}(\lambda) e_{\text{norm}, \text{Dir}(\text{Diff}), \text{SW}(\text{LW})}(h, n) d\lambda dh. \quad (17)$$

В соотношениях (16) и (17)  $\lambda_{\text{init}}$  и  $\lambda_{\text{fin}}$  есть  $\lambda$ , ограничивающие рассматриваемый спектральный диапазон, определяемые функциями  $c_1(\lambda)$ ,  $c_2(\lambda)$ ,  $c_1(\lambda) + c_2(\lambda)$ ,  $0^\circ$  и  $90^\circ$  – угловые высоты Солнца, ограничивающие возможный диапазон угловой высоты Солнца.

Ниже, в качестве примера, приведены результаты расчётов с использованием разработанной методики, описывающие обработку прямой и рассеянной составляющих СИ в SW-спектральном канале тракта управления ЦА и определяющие эффективные режимы воздействия излучения при максимуме солнечной активности ( $n = 5,5$ ), например, в условиях безоблачного неба.

Функция  $T_{h_{\text{max}, \text{Dir}(\text{Diff}), \text{SW}(\text{LW})}}(h, n)$  (2) с учётом (3) в выражении для спектральной плотности прямой и рассеянной составляющих облучённости (4) в рассматриваемых условиях выражается как

$$T_{\text{Dir}(\text{Diff})}(h, n) \approx a_{\text{Dir}(\text{Diff})} \exp(-b_{\text{Dir}(\text{Diff})} h) + T(n). \quad (18)$$

В выражении (18)  $a_{\text{Dir}} = -3780$ ,  $b_{\text{Dir}} = 0,2444$ ,  $a_{\text{Diff}} = 8950$ ,  $b_{\text{Diff}} = 0,2084$ ,  $T(n = 5,5) = 5780$ .

Графики зависимостей (18) изображены на рис. 2.

В выражении (5) коэффициенты имеют следующие значения:  $\tau_{\text{Dir}}(90^\circ) = 0,73$ ,  $d_{\text{Dir}} = 0,0348$ ,  $g_{\text{Dir}} = 1,55$ ,  $\tau_{\text{Diff}}(90^\circ) = 0,13$ ,  $d_{\text{Diff}} = 0,029$ ,  $g_{\text{Diff}} = 1,04$ , а коэффициенты в выражении (6), например, при данных [13] – следующие:  $\alpha_1 = 72,56 \cdot 10^{-9}$  м,  $\sigma_1 = 28,99 \cdot 10^{-9}$  м,  $\lambda_{1, \text{max}} = 445 \cdot 10^{-9}$  м,  $\alpha_2 = 25,89 \cdot 10^{-9}$  м,  $\sigma_2 = 21,21 \cdot 10^{-9}$  м,  $\lambda_{2, \text{max}} = 505 \cdot 10^{-9}$  м.

В соответствии с законом смещения Вина, выражения для  $\lambda_{\text{max}, \text{Dir}}$  и  $\lambda_{\text{max}, \text{Diff}}$  (10) с учётом выражения (3) имеют вид

$$\lambda_{\text{max}, \text{Dir}} = C_3 [-3780 \exp(-0,2444h) + 5780]^{-1}, \quad (19)$$

$$\lambda_{\text{max}, \text{Diff}} = C_3 [8950 \exp(-0,2084h) + 5780]^{-1}. \quad (20)$$

Производные в (9) таковы:

$$\left| \frac{d\lambda_{\text{max}, \text{Dir}}}{dh} \right| = \frac{2,6773 \exp(-0,2444h)}{[-3780 \exp(-0,2444h) + 5780]^2}, \quad (21)$$

$$\left| \frac{d\lambda_{\text{max}, \text{Diff}}}{dh} \right| = \frac{5,4053 \exp(-0,2084h)}{[8950 \exp(-0,2084h) + 5780]^2}. \quad (22)$$

После подстановки выражения (6) с входящими в него коэффициентами  $\alpha_1$ ,  $\sigma_1$ ,  $\lambda_{1, \text{max}}$ ,  $\alpha_2$ ,  $\sigma_2$ ,  $\lambda_{2, \text{max}}$  и выражений (19)–(22) в соотношение (13) – для максимальных значений прямой составляющей СИ в SW-спектральном канале – выражение  $e(h, n)|_{\text{rel}}$  на входе СХЯГ в развёрнутом виде имеет вид

$$e_{\text{Dir}, \text{SW}}(h, n)|_{\text{rel}} =$$

$$= \left( \frac{r}{R} \right)^2 0,73 \cdot 0,5 [1 + \sin(0,0348h - 1,55)] \times \\ \times C_1 \left\{ \frac{C_3}{[-3780 \exp(-0,2444h) + 5780]} \right\}^{-5} \left[ \exp \frac{C_2}{C_3} - 1 \right]^{-1} \times \\ \times \frac{2,6773 \exp(-0,2444h)}{[-3780 \exp(-0,2444h) + 5780]^2} \frac{\alpha_1}{\sigma_1 \sqrt{2\pi}} \\ \times \exp \left[ - \frac{\left( \frac{C_3}{[-3780 \exp(-0,2444h) + 5780]} - 445 \cdot 10^{-9} \right)^2}{2\sigma_1^2} \right]. \quad (23)$$

Аналогичное выражение для рассеянной составляющей СИ в SW-спектральном канале выглядит как

$$e_{\text{Diff}, \text{SW}}(h, n) = \\ = \left( \frac{r}{R} \right)^2 0,13 \cdot 0,5 [1 + \sin(0,029h - 1,04)] \times \\ \times C_1 \left\{ \frac{C_3}{[8950 \exp(-0,2084h) + 5780]} \right\}^{-5} \cdot \left[ \exp \frac{C_2}{\tilde{N}_3} - 1 \right]^{-1} \times \\ \times \frac{5,4053 \cdot \exp(-0,2084h)}{[8950 \cdot \exp(-0,2084h) + 5780]^2} \times \left( \frac{\alpha_1}{\sigma_1 \sqrt{2\pi}} \right) \times \\ \times \exp \left[ - \frac{\left( \frac{C_3}{[8950 \exp(-0,2084h) + 5780]} - 445 \cdot 10^{-9} \right)^2}{2\sigma_1^2} \right].$$

Зависимость СПО от  $\lambda_{\text{max}, \text{Dir}(\text{Diff})}$  и  $h$  на входе СХЯГ представляется в форме

$$e_{\text{Dir}(\text{Diff})}(\lambda_{\text{max}, \text{Dir}(\text{Diff})}, h, n)|_{\text{rel}} = \\ = \left( \frac{r}{R} \right)^2 \tau_{\text{Dir}(\text{Diff})}(h, n) C_1 \lambda_{\text{max}, \text{Dir}(\text{Diff})}^{-5} \times \\ \times \left( \exp \frac{C_2}{\lambda_{\text{max}, \text{Dir}(\text{Diff})} T_{\text{Dir}(\text{Diff})}(h, n)} - 1 \right)^{-1} \times \\ \times c_{1(2)}(\lambda_{\text{max}, \text{Dir}(\text{Diff})}) \left| \frac{d\lambda_{\text{max}, \text{Dir}(\text{Diff})}}{dh} \right| c_{1(2)}(h, n).$$

Угловая высота Солнца, соответствующая максимальному значению  $e_{\text{Dir}, \text{SW}}(h)$ , вычисленная по выражению (23), равна  $h_{\text{max}} 16,14^\circ$ , а соответствующее максимальное значение функции  $e_{\text{Dir}, \text{SW}}(h)|_{\text{rel}}$  составляет 0,01533.

Интегрирование по  $\lambda$  функции  $e_{eS, \text{Dir}, \text{SW}}(\lambda, h)$  по соотношению (7) при  $h_{\text{max}} = 16,14^\circ$  даёт максимальное значение облучённости:

$$E_{\text{Dir}, \text{SW}}(h_{\text{max}} = 16,14^\circ) =$$

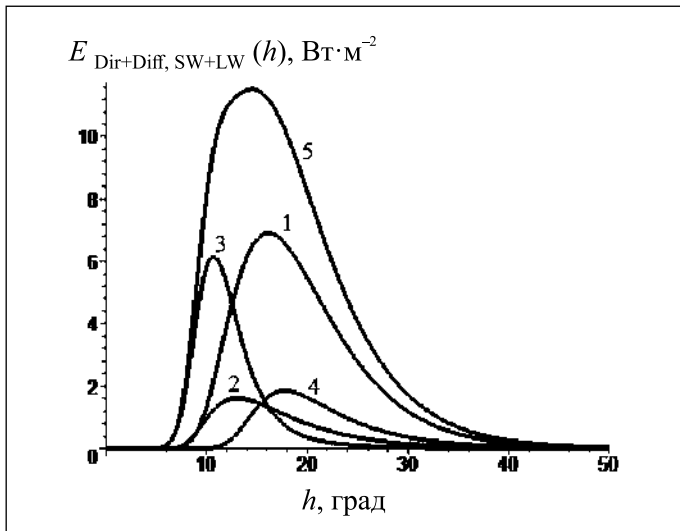


Рис. 3. Зависимости эффективных облучённостей от угловой высоты Солнца при совместном воздействии прямой и рассеянной составляющих СИ одновременно на *SW*- и *LW*-спектральные каналы: 1 – облучённость при воздействии прямой составляющей СИ на *SW*-спектральный канал, 2 – облучённость при воздействии прямой составляющей СИ на *LW*-спектральный канал, 3 – облучённость при воздействии рассеянной составляющей СИ на *SW*-спектральный канал, 4 – облучённость при воздействии рассеянной составляющей СИ на *LW*-спектральный канал, 5 – облучённость, соответствующая сумме прямой и рассеянной составляющих СИ, воздействующих одновременно на *SW*- и *LW*-спектральные каналы

$$= \int_{350 \cdot 10^{-9}}^{570 \cdot 10^{-9}} e_{\text{Dir,SW}}(\lambda) \Big|_{h_{\text{max}}=16,14^\circ} d\lambda = 6,915 \text{ Вт} \cdot \text{м}^{-2}. \quad (24)$$

После умножения вычисленного значения интеграла (24) на нормированную функцию  $e_{\text{norm,Dir,SW}}(h, n)$ , получаемую из  $e_{\text{norm,Dir(Diff),SW(DW)}}(h, n)$  по соотношению (15), выражение для зависимости облучённости  $E_{\text{Dir,SW}}(h)$ , создаваемой прямой составляющей СИ в *SW*-спектральном канале, имеет вид

$$\begin{aligned} E_{\text{Dir,SW}}(h) &= \frac{6,9145}{0,01533} e_{\text{Dir es}}(h) \left| \frac{d\lambda_{\text{max,Dir}}}{dh} \right| c_1(h) = \\ &= 4,5115 \cdot 10^2 \left( \frac{r}{R} \right)^2 \cdot C_1 \left\{ \frac{C_3}{[-3780 \exp(-0,2444h) + 5780]} \right\}^{-5} \times \\ &\quad \times \left[ \exp \frac{C_2}{C_3} - 1 \right]^{-1} \cdot 0,73 \times \\ &\quad \times 0,5 [1 + \sin(0,0348h - 1,55)] \times \\ &\quad \times \frac{2,6773 \exp(-0,2444h)}{[-3780 \exp(-0,2444h) + 5780]^2} \times \\ &\quad \times \left( \frac{\alpha_1}{\sigma_1 \sqrt{2\pi}} \right) \times \\ &\quad \times \exp \left[ - \frac{\left( \frac{C_3}{[-3780 \exp(-0,244h) + 5780]} - 445 \cdot 10^{-9} \right)^2}{2\sigma_1^2} \right]. \quad (25) \end{aligned}$$

Зависимости абсолютных значений эффективной облучённости от угловой высоты Солнца по выражению (25) приведены на рис. 3.

Абсолютное значение эффективной энергетической экспозиции  $H_{\text{Dir,SW}}(\Delta h)$  в интервале угловой высоты Солнца, соответствующем воздействию на *SW*-спектральный канал тракта управления ЦА прямой составляющей облучённости  $E_{\text{Dir,SW}}(h)$ , рассчитывается как

$$H_{\text{Dir,SW}}(\Delta h) = \int_{0^\circ}^{90^\circ} E_{\text{Dir,SW}}(h) dh = 91,218 \text{ Вт} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{град}.$$

При совместном воздействии прямой и рассеянной составляющих СИ одновременно на *SW*- и *LW*-спектральные каналы зависимость абсолютных значений эффективной облучённости от угловой высоты Солнца  $E_{\text{Dir+Diff, SW+LW}}(h)$  описывается суммой

$$\begin{aligned} E_{\text{Dir+Diff,SW+LW}}(h) &= E_{\text{Dir,SW}}(h) + E_{\text{Dir,LW}}(h) + E_{\text{Diff,SW}}(h) + \\ &+ E_{\text{Diff,LW}}(h) = \frac{6,9145}{0,01533} e_{\text{Dir es}}(h) \left| \frac{d\lambda_{\text{max,Dir}}}{dh} \right| c_1(h) + \\ &+ \frac{1,6179}{0,09506} e_{\text{Dir es}}(h) \left| \frac{d\lambda_{\text{max,Dir}}}{dh} \right| c_2(h) + \\ &+ \frac{6,1639}{0,9512} e_{\text{Diff es}}(h) \left| \frac{d\lambda_{\text{max,Diff}}}{dh} \right| c_1(h) + \\ &+ \frac{1,8434}{0,07545} e_{\text{Diff es}}(h) \left| \frac{d\lambda_{\text{max,Diff}}}{dh} \right| c_1(h), \quad (26) \end{aligned}$$

слагаемых которой определяются (аналогично соотношению (25)) по данной методике.

Графики слагаемых в (26)  $E_{\text{Dir,SW}}(h)$ ,  $E_{\text{Dir,LW}}(h)$ ,  $E_{\text{Diff,SW}}(h)$ ,  $E_{\text{Diff,LW}}(h)$  и их суммы приведены на рис. 3.

Абсолютное значение эффективной энергетической экспозиции  $H_{\text{Dir+Diff, SW+LW}}(\Delta h)$  в интервале угловой высоты Солнца  $0^\circ \leq h \leq 43^\circ$ , соответствующем одновременному воздействию на *SW*- и *LW*-спектральные каналы прямой и рассеянной составляющих эффективной облучённости, выражается как

$$\begin{aligned} H_{\text{Dir+Diff,SW+LW}} &= H_{\text{Dir,SW}} + H_{\text{Dir,LW}} + H_{\text{Diff,SW}} + H_{\text{Diff,LW}} = \\ &= 169,845 \text{ Вт} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{град}. \end{aligned}$$

В таблице представлены сводные данные об энергетических характеристиках сигналов управления ЦА при разных сочетаниях воздействий прямой и рассеянной составляющих СИ на *SW*- и *LW*-спектральные каналы.

Данные в последней строке таблицы – облучённости и энергетические экспозиции, реализующиеся в условиях нормального состояния здоровья человека (без фатального поражения одного из спектральных каналов тракта управления ЦА).

Фатальному поражению *LW*-спектрального канала соответствует пятая строка таблицы, а поражению *SW*-спектрального канала – шестая.

Следует отметить, что управление ЦА осуществляется (согласно имеющимся экспериментальным данным) исключительно при непосредственном воздействии СИ на организм человека, то есть в период после восхода и перед заходом Солнца. Данные в таблице полностью соответствуют этому положению: управление ЦА начинается

Эффективные режимы воздействия солнечного излучения в циркадианной области спектра при управлении циркадианной активностью организма человека

| Энергетические характеристики →<br>Виды воздействия ↓                  | $h_{init}$ | $h_{fin}$ | $h_{max}$ | $E(h_{max}), \text{Вт} \cdot \text{м}^{-2}$ | $H, \text{Вт} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{град}$ |
|--|------------|-----------|-----------|---|--|
| Прямое СИ в <i>SW</i> -спектральном канале                             | 7°         | 43°       | 16,14°    | 6,915                                       | 91,218   |
| Прямое СИ в <i>LW</i> -спектральном канале                             | 6°         | 43°       | 13,04°    | 1,618                                       | 18,768   |
| Рассеянное СИ в <i>SW</i> -спектральном канале                         | 4,5°       | 34°       | 10,69°    | 6,164                                       | 38,100   |
| Рассеянное СИ в <i>LW</i> -спектральном канале                         | 10°        | 43°       | 17,78°    | 1,848                                       | 21,731   |
| Прямое и рассеянное СИ в <i>SW</i> -спектральном канале                | 4,5°       | 43°       | 12,56°    | 9,262                                       | 129,341  |
| Прямое и рассеянное СИ в <i>LW</i> -спектральном канале                | 6°         | 43°       | 16,75°    | 2,987                                       | 40,499   |
| Прямое СИ в <i>SW</i> - и <i>LW</i> -спектральных каналах              | 7°         | 43°       | 15,62°    | 8,263                                       | 109,987  |
| Рассеянное СИ в <i>SW</i> - и <i>LW</i> -спектральных каналах          | 4,5°       | 43°       | 10,69°    | 6,164                                       | 59,858   |
| Прямое и рассеянное СИ в <i>SW</i> - и <i>LW</i> -спектральных каналах | 4,5°       | 43°       | 14,10°    | 11,492                                      | 169,845  |

(в утренний период) и заканчивается (в вечерний период) при угловой высоте Солнца  $h = 4,5^\circ$ .

Важным обстоятельством служит и то, что отсутствию нарушений ЦА в реальных случаях воздействия СИ (строки 7–9 таблицы) и случаям фатального поражения одного из спектральных каналов (строки 5 и 6 таблицы) соответствует суточное значение верхней кульминации Солнца  $h_{fin}$ , приблизительно равное  $43^\circ$  (рис. 3). При этом, как видно из рис. 3 и таблицы, при  $h_{fin} \geq 43^\circ$  управление ЦА прекращается. Обработка результатов независимых экспериментальных исследований показала, что полному отсутствию нарушений ЦА человека при произвольных значениях географической широты и суток года соответствует значение  $h_{fin} = 43,13^\circ$  [17]. Дальнейшее увеличение угловой высоты Солнца, например при уменьшении географической широты в произвольные сутки года, не приводит к изменениям ЦА [17].

Совпадение значений  $h_{fin}$ , определённых с использованием предлагаемой методики, и полученных обработкой результатов независимых экспериментальных исследований свидетельствует о практической применимости этой методики. Адекватность результатов вычислений, получаемых с использованием последней, свидетельствует о возможности её использования в теоретических и экспериментальных исследованиях ЦА, учитывающих воздействие оптического излучения на организм человека.

## Заключение

Приведённые на рис. 3 и в таблице эффективные облучённости и энергетические экспозиции могут использоваться в экспериментальных исследованиях неосознаваемых суточных реакций организма человека на уровни воздействующих облучённости и энергетической экспозиции при разных сочетаниях прямой и рассеянной составляющих оптического излучения на *SW*- и *LW*-спектральные каналы тракта управления ЦА. Использование предлагаемой методики позволяет определять облучённости и энергетические экспозиции, управляющие ЦА человека, также и при наличии разных видов облачного покрова [9]. Результаты настоящей работы, в частности, могут служить основой для организации исследований по нарушениям ЦА при трансмеридианальных авиационных перелётах и сменной работе на предприятиях с непрерывным циклом производства. Кроме того, полученные в работе сведения могут быть использованы при разработке специальных облучательных установок для предотвращения нарушений ЦА, коррекции ЦА в случае их возникновения и для поддержания должной ЦА человека в условиях суточного дефицита СИ, что особенно актуально в связи с необходимостью защиты национальных интересов на приполярных и полярных территориях страны и развитии их хозяйственного использования.

1. Гальярди Р.М., Карн Ш. Оптическая связь: Пер. с англ. / Под ред. А.Г. Шереметьева. – М.: Связь, 1978. – 424 с.
2. Мешков В.В. Основы светотехники: Учеб. пособие для вузов. Ч. 1. – 2-е изд., перераб. – М.: Энергия, 1979. – 368 с.
3. Leonidov A.V. Changes in irradiance and illuminance on Earth surface during 11 – year solar activity cycle // *Light & Engineering*. – 2020. – Vol. 28, No. 2. – P. 61–66,
4. Аллен К.У. Астрофизические величины. Справочное изд. Пер. с англ. – М.: Мир, 1977. – 279 с. (*Allen C.W. Astrophysical quantities*. – London: The Athlone Press, 1973. – 279 p.)
5. Мартынов Д.Я. Курс практической астрофизики. – М.: Наука, 1977.
6. Schwabe H. Sonnenbeobachtungen im Jahre 1843 // *Astronomische Nachrichten*. – 1844. – Vol. 21. – P. 233.
7. Шварцер К. Освещение с управляемым цветом – исследование и оптимизация систем управления цветовым освещением / Заключительный отчет, 2006. URL: <http://www.bocom.eu/rus/catalog/downloads/Farblichtstadie.rus.pdf> (дата обращения: 30.07.2019).
8. Кононович Э.В., Мороз В.И. Общий курс астрономии: Учебное пособие / Под ред. В.В. Иванова. Изд. 2-е, испр. – М.: Едиториал УРСС, 2004. – 544 с.
9. Leonidov A.V. Calculation of the Natural Illumination of the Earth's Surface at Different States of Cloud Cover // *Izvestiya – Atmospheric and Oceanic Physics*. – 2019. – Vol. 55, No. 11. – P. 1592–1601.
10. Leonidov A.V. On optical receivers in pathway implicated in control of human circadian rhythm // *Biophysics*. – 2016. – Vol. 61, No. 6. – P. 1002–1010.
11. Brainard G.C., Glickman G.L. The biological potency of light in humans: significance to health and behavior / *CIE152*: 2003.
12. Брейнард Г.К., Гликман Г.Л. Биологическое влияние света на здоровье и поведение человека // *Светотехника*. – 2004. – № 1. – С. 4–8.
13. Thapan K., Arendt J., Skene D.J. An action spectrum for melatonin suppression: evidence for a novel non – rod, non – cone photoreceptor system in humans // *J. Physiol*. – 2001. – Vol. 535. – P. 261–267.
14. Brainard G.C., Provencio I. Photoreception for the neurobehavioral effects of light in humans / *CIE031:2006 «Proc. 2nd CIE Expert Symposium on «Lighting and Health»»*. – P. 6–21.
15. Венцель Е.С. Теория вероятностей. Изд 2-е, перераб. и доп. – М.: Физматгиз, 1962. – 564 с.
16. Левин Б.Р. Теоретические основы статистической радиотехники. Книга первая. – М.: Советское радио, 1966. – 728 с.
17. Leonidov A.V. On conditions of occurrence of seasonal disorders in human circannual and circadian rhythm // *Biophysics*. – 2014. – Vol. 59, No. 1. – P. 157–161.



**Леонидов Александр Вячеславович,**  
кандидат техн. наук. Окончил в 1970 г. МЭИ  
по специальности «Светотехника и источники  
света»

Российские учёные обнаружили чрезвычайно яркие вспышки, которые испускал искусственный алмаз, содержащий примеси германия. Необычное по характеристикам излучение исследователи связали с переходом германиевых центров к своеобразному коллективному состоянию. В результате вероятность поглощения и излучения света увеличивалась в разы. Результаты работы опубликованы в журнале «*Physical Review B*» (*N.A. Lozing, M.G. Gladush, I. Yu. Eremchev, E.A. Ekimov, A.V. Naumov Stochastic superflares of photoluminescence from a single microdiamond with germanium-vacancy color centers: A general phenomenon or a unique observation // Phys. Rev. B102, 060301(R) – Published 12 August 2020*).

По структуре алмаз представляет собой кристаллическую решётку, в которой каждый атом углерода связан с четырьмя ближайшими соседями, расположенными в вершинах правильного тетраэдра. Алмаз очень прочен, нетоксичен для живых организмов и достаточно прост для синтеза, при этом сохраняется возможность замещения нескольких узлов кристаллической решётки атомами других элементов. Подобные замены называют точечными дефектами кристалла. Такие примеси, как азот, кремний и германий позволяют алмазам эффективно поглощать и испускать свет, что обеспечивает характерный цвет кристалла. Оптические свойства алмазов с примесями зависят от внешних условий: температуры, давления, параметров электрических и магнитных полей, а потому их можно использовать в качестве сенсоров

В ходе поддержанной грантом Российского научного фонда работы коллективу под руководством профессора РАН Андрея Наумова удалось пронаблюдать и объяснить необычный эффект значительного (более чем на порядок величины) возрастания интенсивности свечения алмаза за очень короткий промежуток времени – от нескольких секунд до минут. Исследователи наблюдали необычную по своим характеристикам люминесценцию в одном из искусственных микроалмазов с примесями германия. Алмаз был создан с использованием оригинального метода синтеза при высоком давлении и температуре.

Для изучения оптико-спектральных свойств алмазов с германиевыми примесями специалисты использовали технику лазерной флуоресцентной спектроскопии. Микрокристаллы, размещённые на поверхности прозрачного стекла, освещали непрерывным зелёным светом лазера, а возникающее при этом излучение детектировала высокочувствительная камера. Свечение одного из исследованных алмазов представляло собой повторяющиеся яркие вспышки, возникающие в германиевых центрах. В основе механизма, вероятно, лежит кооперация между отдельными центрами, представляющими источники излучения. Авторы полагают, что это явление носит всеобщий характер, и дальнейшие эксперименты с условиями синтеза алмазов позволят получать подобные сверхъяркие частицы.

«Понимание природы наблюдаемого эффекта не только внесёт вклад в копилку фундаментальных знаний, но и может заложить основу фотонных и оптоэлектронных устройств нового поколения», – подчеркнул Наумов (зав. лабораторией электронных спектров молекул Института спектроскопии РАН).

# Реализуем светотехнические проекты любого уровня сложности



ООО «Светосервис - СПб»  
195112, г. Санкт-Петербург,  
Заневский проспект, дом 54,  
корпус 5



[info@spb.svsrv.ru](mailto:info@spb.svsrv.ru)  
[svetoservis.ru](http://svetoservis.ru)



+7 (812) 448-57-19

# Оценка и подбор цветковых пространств для цифровых систем

В.Л. ЖБАНОВА

Филиал НИУ «МЭИ» в Смоленске, Смоленск  
E-mail: vera-zhbanova@yandex.ru

## Аннотация

Рассмотрено влияние выбора цветкового пространства на цветковое различие контрольных цветов при работе с матричными фотоприёмниками (МФП). Спектральные характеристики МФП разных изготовителей заметно отличаются друг от друга и от функций сложения рабочей системы *RGB*, что может объяснять различие по качеству цветопередачи разных цифровых устройств. В статье предложен программный метод исследования цветопередачи изображения, получаемого цифровыми устройствами, основанный на подборе для каждого МФП индивидуального цветкового пространства. Для анализа и оценки возможностей спектральных характеристик МФП использован метод контрольных цветов на основе атласа Манселла. Проведён анализ полученных параметров 14 цветов по разным критериям для 7 цветковых пространств: *sRGB*, *AdobeRGB*, *DCI-P3 RGB*, *MINIPI*, *PAL/SECAM*, *Wide Gamut RGB*, *ProPhoto RGB*. Изучено также влияние выбора цветкового пространства на изменение координат стандартного источника света с коррелированной цветовой температурой 6500 К. Показано, что с опорой на цветковые различия контрольных цветов возможен выбор оптимального цветкового пространства для работы с конкретным МФП, что позволит снижать цветковые искажения на первичном этапе регистрации изображения. Предложены способы улучшения колориметрического метода контрольных цветов применительно к цифровым устройствам на программном уровне.

**Ключевые слова:** цвет, цветковое пространство, цветковое различие, цифровое устройство, матричный фотоприёмник, *RGB*.

## Введение

Одним из основных электронных блоков цифровых регистрирующих устройств является многоэлементное матричное фотоприёмное устройство – матрица или матричный фотоприёмник (МФП). Именно от его характеристик во многом зависит качество получаемого изображения. Процесс цветodelения в большинстве устройств захвата изображения осуществляется самим МФП. Системы цветodelения постоянно развиваются, что требует больших материальных и временных затрат [1].

Цифровые устройства для регистрации и воспроизведения цветных изображений используют разные цветковые пространства. Разнообразие этих пространств связано с возможностями современной техники. К примеру, *ProPhoto RGB* разработано с цветковым охватом обрабатываемой фотоплёнки, *sRGB* основано на возможностях воспроизводящих систем, а *AdobeRGB* – на возможностях цифровой печати. Производители техники стараются придерживаться установленных стандартов, подгоняя характеристики под них. Так, цифровые фотокамеры с разными

спектральными характеристиками МФП используют в основном *sRGB* или *AdobeRGB* [2, 3], а искажения цвета нивелируют разными программами коррекции. При визуализации и печати исходного изображения, возникают дополнительные искажения цвета и, соответственно, отсутствие адекватной цветопередачи в готовом снимке. Именно поэтому важно получать максимально «чистый» первичный цифровой оттиск.

Передовые пользователи используют специальный формат для возможности выбора рабочего цветкового пространства – *RAW*, который содержит параметры каждого основного цвета – *R* (красный), *G* (зелёный) и *B* (синий), снятого непосредственно с МФП и не подвергнутого ни интерполяции, ни цифровой фильтрации. Далее пользователь в разных программах может задавать любую колориметрическую систему как рабочую. Обычно выбирают такие цветковые профили как *Wide Gamut RGB* и *ProPhoto RGB* – за большое тело цветкового охвата. Однако иногда лучшего результата можно добиться, применяя цветковое пространство с меньшим охватом, что связано, прежде всего, с изначальными данными по цвету, снятыми с МФП, имеющего разные спектральные характеристики каналов основных цветов.

С каждым годом предлагаются всё новые методы обработки, преобразования и улучшения изображений, получаемых цифровыми устройствами, которые являются всего лишь конечной стадией обработки [4–7]. Все усилия производителей направлены на улучшения оптики и программного обеспечения. При этом упускается влияние взаимодействия цветкового пространства с характеристиками МФП. Спектральные характеристики светофильтров системы цветodelения камер существенно отличаются как между собой, так и от кривых сложения используемой стандартной колориметрической системы.

Одним словом, проблему цветковых искажений пытаются решить поверхностно, не вдаваясь во влияние характеристик МФП.

Целью настоящей работы было исследование взаимодействия рабочих цветковых пространств с разными спектральными характеристиками МФП, а задачами – выбор и анализ спектральных характеристик МФП известных производителей (1); выбор и описание рабочих цветковых пространств (2); разработка методики исследования (3); анализ полученных результатов (4); формулировка рекомендаций по взаимодействию рабочих цветковых пространств со спектральными характеристиками МФП (5).

## Представленные матричные фотоприёмники

В качестве объектов исследования были выбраны МФП трёх производителей: *Sony*, *Kodak* и *Agilent* (рис. 1) [3]. Их идеальные спектральные характеристики, можно считать, имеют плавную куполообразную форму с единичными максимумами на рабочей длине волны  $\lambda$ . К примеру, иде-

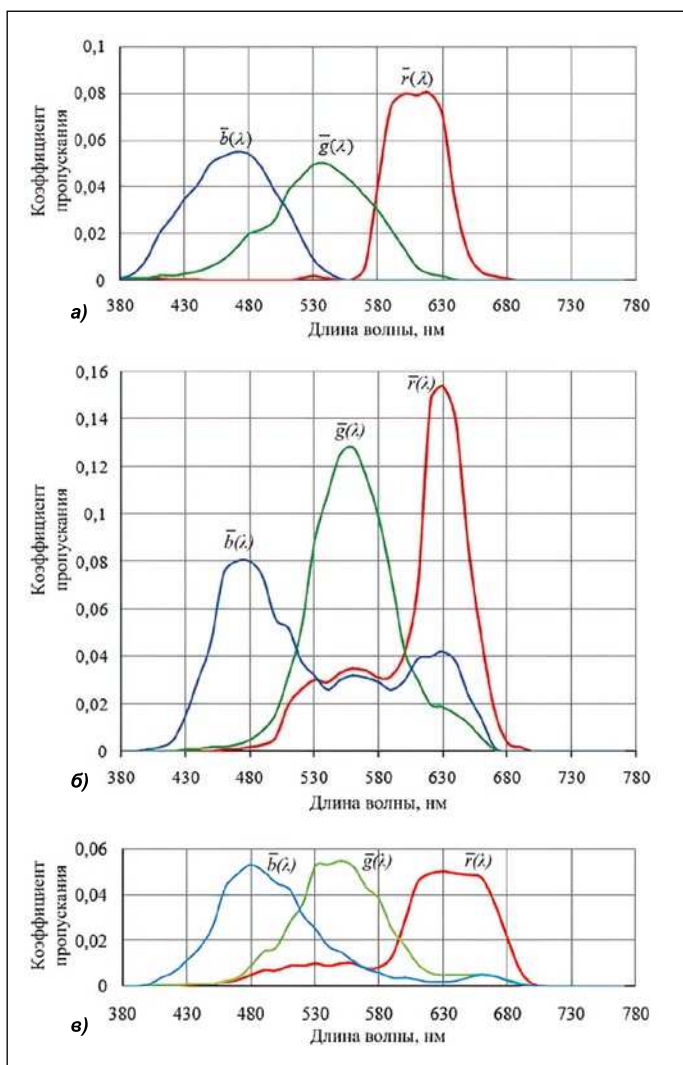


Рис. 1. Спектральные характеристики матричных фотоприёмников Sony (а), Kodak (б) и Agilent (в)

ально, когда максимум спектральной кривой по зелёному каналу приходится на  $\lambda$  555 нм.

МФП Sony имеет достаточно плавные кривые без второстепенных пиков. Но кривая по зелёному каналу имеет максимум на  $\lambda$  540 нм, и кривые по зелёному и синему каналам имеют довольно большие области охвата по спектру. Передача сине-зелёных оттенков цвета для человека особенно важна, т.к. в окружающей среде преобладают именно они (небо, отражение водной глади, листья, трава и т.д.). Кривой по красному каналу соответствует высокий уровень пропускания, и её пик раздвоен.

При рассмотрении спектральных характеристик МФП Kodak заметны второстепенные пики кривых по красному и синему каналам, перекрывающиеся друг друга. Возможно, на программном уровне производители учли подобные неоднородности системы и как-то их компенсировали. Но в исследовании будут обрабатываться оригинальные кривые.

Спектральные характеристики МФП Agilent схожи с предыдущими. Кривые по красному и синему каналам имеют не второстепенные пики, а «хвосты», заходящие в нерабочие области. Кроме того, пики всех кривых широкие и неровные, и это ухудшает рабочие свойства МФП и передачу «чистых» цветов. Этим кривым соответству-

ет низкое пропускание по сравнению с другими МФП, но т.к. далее учитывается цветность, а не цвет контрольных образцов, то уровень пропускания на результатах сказываться не должен.

Из этого следовало, что МФП Sony должно обладать наименьшими цветовыми искажениями из числа рассмотренных. Но мы вернёмся к этому предположению по окончании описания и исследования, ниже.

## Исследуемые цветовые пространства

Рабочими цветовыми пространствами выбраны современные системы *sRGB*, *AdobeRGB*, *DCI-P3 RGB*, *MINIPI*, *PAL/SECAM*, *Wide Gamut RGB*, *ProPhoto RGB* [1, 2], с различным телом цветового охвата (ТЦО). При этом в основном подбирались системы с опорным белым цветом *D65*. Исключениями стали *Wide Gamut RGB*, *ProPhoto RGB* с цветом *D50*, аналогов которых по ТЦО нет.

Система *sRGB* разработана в качестве стандартной для веб- и мультимедиа-приложений. Фактически это цветовое пространство и следующее за ним – основные для всех цифровых устройств регистрации изображений.

Пространство *AdobeRGB* имеет увеличенный цветовой охват по сравнению с *sRGB*, применяясь в типографской и цифровой печати.

*DCI-P3 RGB* является новым цветовым пространством, имитирующим цветовую палитру киноплёнки. Эта система разработана сообществом инженеров кино и телевидения в качестве стандарта для цифровых кинотеатров. Новое пространство превосходит по цветовому охвату *sRGB* и в зелёно-жёлтой области оно меньше, а в жёлто-красной области больше, чем *Adobe RGB*. Сейчас система *DCI-P3 RGB* внедряется в смартфоны и планшеты. Но сможет ли составить достойную конкуренцию первым двум цветовым пространствам?

Система *MINIPI* разработана автором и была исследована на программном уровне и экспериментально [8, 9]. Система показала хороший результат по всем критериям, но ещё не сравнивалась с ведущими цветовыми пространствами. *MINIPI* позиционируется как цветовое пространство с максимальным цветовым охватом, но при этом с минимальными отрицательными кривыми сложения для лучшей работы с цифровыми устройствами. Система *MINIPI* имеет реальные основные цвета. При анализе стандартного источника света (СИС) *E* (с равноэнергетическим спектром излучения) доказана согласованность *MINIPI* с системой *XYZ* МКО 1931 г. Полученные спектральные характеристики (кривые) по форме превосходят современные аналоги и позволят минимизировать потери при воспроизведении цвета. Математическое моделирование и сравнение теоретических и практических кривых дали удовлетворительные результаты.

Пространство *PAL/SECAM* основано на цветностях цветообразующих стимулов, рекомендованных европейским радиовещательным видеостандартом. Является стандартом телевизионных и видеопередающих систем.

Пространство *Wide Gamut RGB* – с максимально возможным цветовым охватом (78 %), чистыми спектральными основными цветами ( $\lambda$  700, 525 и 450 нм) и точкой белого цвета *D50*.

*ProPhoto RGB* почти полностью покрывает цветовой охват человеческого глаза, разработано для возможности



хранения фотоснимков и изображений без потери информации при недостаточности цветового охвата рабочего цветового пространства. При этом зелёный и синий цвета – мнимые. Точка белого – *D50*.

Основные цвета систем *RGB* представлены на рис. 2.

### Методика расчёта цветовых параметров

Методика расчёта координат цвета контрольных цветов заключается в интегральном нахождении значений цвета объекта, освещённого источником света определённого спектра, прошедшего через регистрацию МФП с определёнными спектральными характеристиками и дальнейшего преобразование в одно из цветовых пространств, по формулам. [10, 11]

$$R' = \int_{\lambda=400\text{нм}}^{770\text{нм}} \varphi(\lambda) S_R(\lambda) \bar{r}(\lambda) r_{N,\lambda} d\lambda,$$

$$G' = \int_{\lambda=400\text{нм}}^{770\text{нм}} \varphi(\lambda) S_G(\lambda) \bar{g}(\lambda) r_{N,\lambda} d\lambda,$$

$$B' = \int_{\lambda=400\text{нм}}^{770\text{нм}} \varphi(\lambda) S_B(\lambda) \bar{b}(\lambda) r_{N,\lambda} d\lambda,$$

где  $\varphi(\lambda)$  – спектральная плотность потока излучения;  $S_R(\lambda)$ ,  $S_G(\lambda)$ ,  $S_B(\lambda)$  – спектральные характеристики МФП;  $\bar{r}(\lambda)$ ,  $\bar{g}(\lambda)$ ,  $\bar{b}(\lambda)$  – кривые сложения цветовых пространств;  $r_{N,\lambda}$  – коэффициент спектральной яркости контрольных образцов.

В данном случае будут получены координаты цвета в линейном пространстве  $R'$ ,  $G'$ ,  $B'$ . Чтобы представить координаты цвета в требуемом пространстве необходимо их преобразовать в нелинейное пространство *RGB*, т.е. учесть  $\gamma$ -преобразование, яркостное преобразование и т.д. Кроме того, при необходимости проводят и колориметрическую коррекцию. Но в данном исследовании эти этапы не проводятся, т.к. все значения координат необходимо представить в системе *XYZ*.

Далее координаты цвета преобразуются из *RGB* в *XYZ* по выражению

$$\begin{pmatrix} X \\ Y \\ Z \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} X_R & X_G & X_B \\ Y_R & Y_G & Y_B \\ Z_R & Z_G & Z_B \end{pmatrix} \begin{pmatrix} R' \\ G' \\ B' \end{pmatrix},$$

где  $X_R$ ,  $X_G$ ,  $X_B$ ,  $Y_R$ ,  $Y_G$ ,  $Y_B$ ,  $Z_R$ ,  $Z_G$ ,  $Z_B$  – коэффициенты пересчёта для конкретной системы *RGB*.

Расчёт коэффициентов пересчёта каждого цветового пространства производился по методике [10, с. 236–247, 249–256]. К примеру, для пространства *PAL/SECAM* коэффициенты составили 0,514, 0,265, 0,024, 0,324, 0,670, 0,123, 0,162, 0,065, 0,853 соответственно.

После преобразования находят координаты цветности:

$$\begin{cases} x = \frac{X}{X+Y+Z}; \\ y = \frac{Y}{X+Y+Z}. \end{cases} \quad \begin{cases} u' = \frac{4x}{-2x+12y+3}; \\ v' = \frac{9y}{-2x+12y+3}. \end{cases}$$

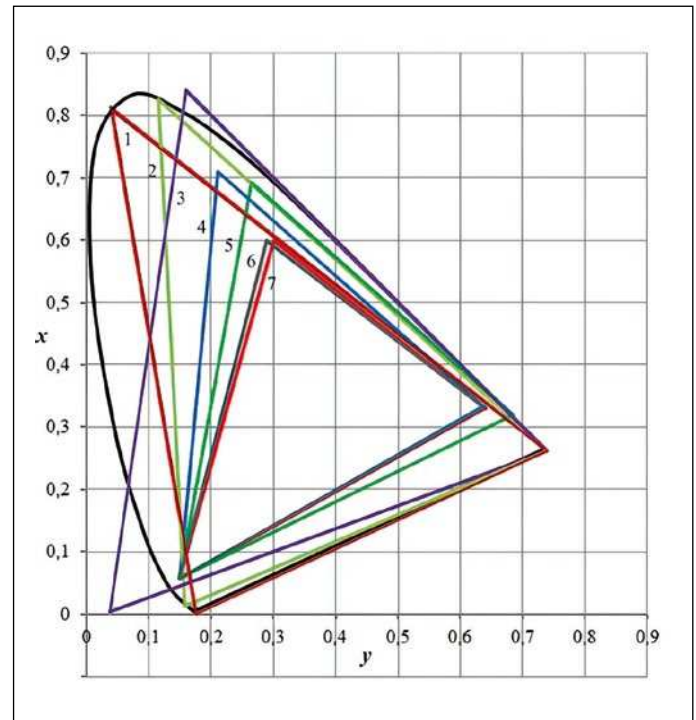


Рис. 2. Исследуемые цветовые пространства на цветовом графике *xy*: 1 – *M1N1P1*; 2 – *Wide Gamut RGB*; 3 – *ProPhoto RGB*; 4 – *AdobeRGB*; 5 – *DCI-P3 RGB*; 6 – *PAL/SECAM*; 7 – *sRGB*

Система *XYZ* не является равноконтрастной, и потому для адекватного сравнения полученных значений с теоретическими данными необходимо координаты цветности переводить в равноконтрастную колориметрическую систему, где цветовой порог различия двух цветов должен быть одинаков по всему цветовому пространству. По рекомендации МКО, возможен выбор из большого числа подобных систем: *CIEUVW*, *CIELUV*, *CIELAB* и *CIECAM* [12, 13]. Однако все они ориентированы на определение изменения цвета, а в случае подбора цветового пространства под спектральные характеристики МФП необходимо больше акцентироваться на адекватности передачи цветности. На значения координат цвета в реальной цифровой системе влияет много факторов: динамический диапазон, размер чувствительной поверхности, шумы и др. Цвет зависит от светлоты, цветность же постоянна. Поэтому, чтобы в дальнейшем можно было сравнить результаты математического исследования с экспериментальными, было решено провести анализ цветового различия по цветности на равноконтрастном графике  $u'v'$  1974 г., где, в отличие от  $uv$  1960 г., жёлтые, оранжевые и красные цветности более сбалансированы.

Соотношение координат цветности на цветовых графиках  $xy$  и  $u'v'$  определяется как

Изменение цветности определялось как евклидово расстояние в равноконтрастной области вдоль кратчайшего пути между точками цветов, т.е. расстояние, по сути, явля-

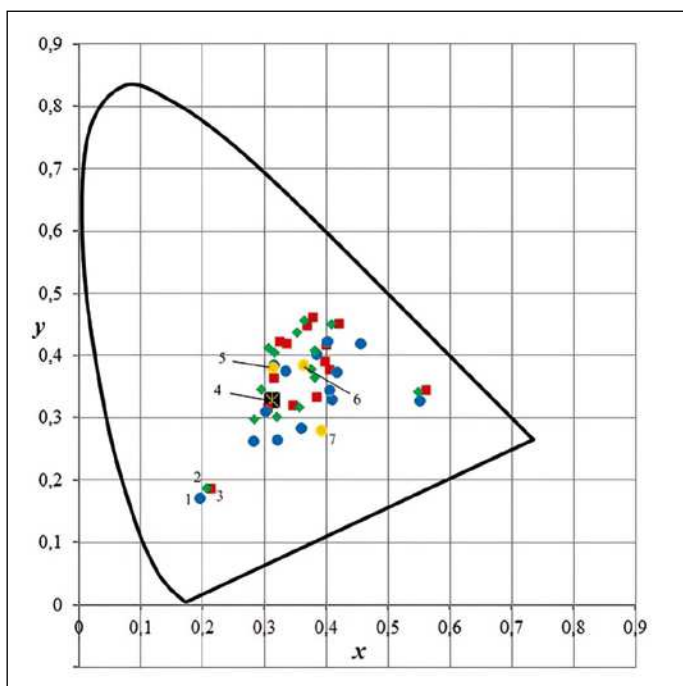


Рис. 3. Координаты цветности 14 цветов из атласа Манселла в системе XYZ: 1 – Sony; 2 – Agilent; 3 – Kodak; 4 – СИС D65; 5 – источник света Agilent; 6 – источник света Kodak; 7 – источник света Sony

ющееся длиной некоторого кривого пути между соответствующими точками цветов в пространстве МКО 1931 г.,

$$\Delta e_{uv'} = \sqrt{(u'_p - u'_t)^2 + (v'_p - v'_t)^2},$$

где  $u'_p, v'_p$  – координаты цветности, полученные при взаимодействии спектральных характеристик МФП и цветового пространства;  $u'_t, v'_t$  – координаты цветности, полученные в пространстве XYZ без влияния МФП.

В качестве излучателя был выбран СИС D65 (с КЦТ 6500 К) [14], со стандартизированным близким к полуденному дневному спектром излучения.

Контрольными образцами были выбраны 14 цветов атласа Манселла, применяемых для расчёта общего индекса цветопередачи  $R_a$  [10]. Анализировались усреднённые значения цветового различия  $\Delta e$  по группам образцов средней насыщенности – от № 1 до № 8, большей насыщенности – от № 9 до № 12 и специальных – № 13 (кожа лица) и № 14 (листва).

Весь алгоритм методики расчёта был реализован в среде «MATLAB». На рис. 3 представлены координаты цветности 14 контрольных цветов для исследуемых МФП при использовании пространства sRGB. Пример выходных значений координат цвета для МФП Sony из пространства sRGB представлен в табл. 1, где  $\Delta x, \Delta y$  и  $\Delta u', \Delta v'$  – разности между координатами цветности контрольных образцов, рассчитанных в системе XYZ без включения МФП и в системе sRGB с включением МФП, переведённые в XYZ посредством коэффициентов перехода. Согласно ГОСТ [14], значения координат цветности для СИС не должны превышать 0,01. Для МФП Sony ни одно пространство не соответствует этому требованию к СИС D65 (табл. 2 и 3).

При нахождении координат источника света в этих пространствах необходимо выполнять  $\gamma$ -коррекцию, возможно, в результате которой цвет будет максимально соответ-

ствовать теории. Для sRGB показатель  $\gamma$  не однороден по всему пространству, что усложняет подобную манипуляцию. Возможно, именно по этой причине баланс белого в цифровых устройствах происходит также по определённым контрольным цветам, а не по самому источнику. Как видно из табл. 2, лучший результат был получен для ProPhoto RGB, а худший – для sRGB. В результате программного расчёта были получены значения цветовых различий и найдены их средние значения по определённым группам образцов, представленные в табл. 3–5.

Аналогичные расчёты и преобразования производились с МФП Kodak и Agilent (табл. 3–5). В таблицах представлены усреднённые значения по трём основным группам: №№ 1–8, 9–12 и 13–14, а также усреднённое значение по всем цветам и для №№ 1–12, и в них выделены лучшие и худшие результаты вычислений.

### Анализ результатов исследования

Анализ приведённых МФП и цветовых пространств проводился в рамках только данного исследования.

Для МФП Sony наилучшими цветовыми пространством в данном исследовании явились Wide Gamut RGB и ProPhoto RGB (табл. 3), а наихудшими – sRGB и PAL/SECAM. Несмотря на то, что обе последние системы достаточно близки по координатам основных цветов, PAL/SECAM всё-таки лучше sRGB. Остальные же системы показали хороший, но не отличный результат.

Для МФП Kodak лучшими стали DCI-P3 RGB, MINIP1 и Wide Gamut RGB (табл. 4). У этих систем хорошие показатели по нескольким группам. ProPhoto RGB – худшая в применении для этого МФП, несмотря на большой свой цветовой охват. Как и следовало ожидать, худшие результаты пришлись на группу большей насыщенности. МФП имеет второстепенные максимумы в разных областях спектра, не позволяя выделить «чистый» цвет в насыщенных оттенках. Вследствие этого в Wide Gamut RGB получен хороший результат лишь по средней насыщенности. Пространства sRGB и PAL/SECAM имеют в связке с МФП Kodak как достоинства, так и недостатки, хотя лучшие показатели по источнику света именно у них.

Для МФП Agilent также можно выделить sRGB и PAL/SECAM. Приемлемые показатели у AdobeRGB, DCI-P3 RGB, MINIP1 и Wide Gamut RGB (табл. 5), а худшим оказалось пространство ProPhoto RGB, т.к. этот МФП как и МФП Kodak имеет спектральные характеристики со второстепенными максимумами.

Таким образом, чем больше второстепенных максимумов у кривой спектральной характеристики МФП, тем меньше должно быть тело цветового охвата (с большими отрицательными ветвями, которые, возможно, и компенсируют эти второстепенные максимумы).

Из табл. 6 следует, что наилучшими цветовыми пространствами можно назвать DCI-P3 RGB и MINIP1, которые, не имея особых замечаний, даже показывают некоторые лучшие результаты по всем МФП. Несмотря на это, наилучшим стал МФП Sony с рабочим цветовым пространством Wide Gamut RGB, с наименьшими цветовыми искажениями по всем группам контрольных образцов. В табл. 6 представлено, во сколько раз цветовое различие у других МФП с разными цветовыми пространствами больше, чем у МФП Sony с Wide Gamut RGB. Наихудшие результаты,

Пример цветового различия образцов для МФП *Sony* из пространства *sRGB*

| Координаты цветности         | Номера контрольных цветов |             |               |                |                |              |                   |           |                      |        |         |        |                       |                        |
|------------------------------|---------------------------|-------------|---------------|----------------|----------------|--------------|-------------------|-----------|----------------------|--------|---------|--------|-----------------------|------------------------|
|                              | 1                         | 2           | 3             | 4              | 5              | 6            | 7                 | 8         | 9                    | 10     | 11      | 12     | 13                    | 14                     |
| Группы                       | Средней насыщенности      |             |               |                |                |              |                   |           | Большей насыщенности |        |         |        | Специальные           |                        |
| Цвет                         | Светлый серо-красный      | Серо-желтый | Жёлто-зеленый | Светло-зеленый | Светло-голубой | Светло-синий | Светло-фиолетовый | Пурпурный | Красный              | Жёлтый | Зелёный | Синий  | Розоватый (цвет кожи) | Зелёный (цвет листьев) |
| <i>X</i>                     | 21,58                     | 18,14       | 15,78         | 14,40          | 16,99          | 18,81        | 21,32             | 23,92     | 12,72                | 35,78  | 9,19    | 4,56   | 38,57                 | 6,12                   |
| <i>Y</i>                     | 17,30                     | 16,20       | 16,51         | 16,07          | 17,25          | 17,32        | 17,47             | 18,74     | 7,49                 | 32,64  | 11,20   | 3,94   | 32,49                 | 6,37                   |
| <i>Z</i>                     | 13,70                     | 9,12        | 6,83          | 12,39          | 21,68          | 29,98        | 27,31             | 23,75     | 2,79                 | 9,80   | 8,73    | 14,59  | 23,73                 | 3,41                   |
| <i>x</i>                     | 0,4104                    | 0,4174      | 0,4035        | 0,3359         | 0,3038         | 0,2845       | 0,3226            | 0,3602    | 0,5531               | 0,4574 | 0,3155  | 0,1974 | 0,4069                | 0,3847                 |
| <i>y</i>                     | 0,3290                    | 0,3727      | 0,4220        | 0,3750         | 0,3085         | 0,2620       | 0,2642            | 0,2822    | 0,3258               | 0,4173 | 0,3845  | 0,1706 | 0,3428                | 0,4009                 |
| $\Delta x$                   | 0,0129                    | 0,0134      | 0,0172        | 0,0411         | 0,0375         | 0,0342       | 0,0236            | 0,0130    | 0,1159               | 0,0026 | 0,0558  | 0,0400 | 0,0145                | 0,0188                 |
| $\Delta y$                   | 0,0197                    | 0,0074      | 0,0365        | 0,0281         | 0,0016         | 0,0225       | 0,0379            | 0,0455    | 0,1341               | 0,0260 | 0,0328  | 0,0227 | 0,0076                | 0,0265                 |
| <i>u'</i>                    | 0,2680                    | 0,2515      | 0,2224        | 0,1968         | 0,1994         | 0,2041       | 0,2335            | 0,2543    | 0,3812               | 0,2580 | 0,1807  | 0,1698 | 0,2583                | 0,2185                 |
| <i>v'</i>                    | 0,4832                    | 0,5054      | 0,5234        | 0,4943         | 0,4556         | 0,4230       | 0,4304            | 0,4483    | 0,5052               | 0,5295 | 0,4956  | 0,3300 | 0,4897                | 0,5124                 |
| $\Delta u'$                  | 0,0008                    | 0,0123      | 0,0225        | 0,0340         | 0,0262         | 0,0178       | 0,0002            | 0,0155    | 0,2943               | 0,0093 | 0,0420  | 0,0285 | 0,0067                | 0,0207                 |
| $\Delta v'$                  | 0,0128                    | 0,0012      | 0,0105        | 0,0063         | 0,0065         | 0,0218       | 0,0324            | 0,0343    | 0,0699               | 0,0097 | 0,0060  | 0,0315 | 0,0061                | 0,0076                 |
| $\Delta e$                   | 0,0128                    | 0,0123      | 0,0248        | 0,0346         | 0,0270         | 0,0282       | 0,0324            | 0,0376    | 0,3025               | 0,0134 | 0,0424  | 0,0425 | 0,0090                | 0,0221                 |
| $\overline{\Delta e_{u'v'}}$ | 0,0262                    |             |               |                |                |              |                   |           | 0,1002               |        |         |        | 0,0156                |                        |

как видим, оказались у МФП *Agilent*. В целом лучшим приёмником оказался МФП *Sony* (лучшие результаты по всем показателям в сравнении с двумя другими), а лучшими цветовыми пространствами (без замечаний) *DCI-P3 RGB* и *MINIP1*. Это значит, что новая цветовая система *DCI-P3 RGB* может быть весьма конкурентоспособна с *sRGB* и *AdobeRGB*. И всё же надо продолжать разрабатывать новые цветовые пространства, т.к. и система *MINIP1* показала хороший результат и ряд преимуществ [9].

### Заключение

Исследованы цветовые пространства *sRGB*, *AdobeRGB*, *DCI-P3 RGB*, *MINIP1*, *PAL/SECAM*, *Wide Gamut RGB*, *ProPhoto RGB* на базе спектральных характеристик МФП *Sony*, *Agilent*, *Kodak* для цифровых систем. Формы спектральных характеристик МФП напрямую влияют на результаты цветового разрешения. Не всегда большой цветовой охват показывает лучшие результаты, многое зависит от МФП. Но, как показали результаты исследования,

недостатки кривых спектральных характеристик МФП можно уменьшать подбором определённого рабочего цветового пространства. Это возможно предусмотреть предварительным расчётом цветового различия контрольных

Таблица 2

### Набор корректирующих светофильтров

| МФП <i>Sony</i>       | $\Delta x$ | $\Delta y$ |
|-----------------------|------------|------------|
| <i>sRGB</i>           | 0,080      | -0,050     |
| <i>AdobeRGB</i>       | 0,027      | -0,019     |
| <i>DCI-P3 RGB</i>     | 0,063      | -0,034     |
| <i>PAL/SECAM</i>      | 0,071      | -0,048     |
| <i>MINIP1</i>         | 0,011      | -0,053     |
| <i>Wide gamut RGB</i> | 0,030      | -0,045     |
| <i>ProPhoto RGB</i>   | -0,004     | -0,015     |

Координаты цветности образцов МФП Sony

| Цветовые пространства   | Усреднённое значение $\Delta e$ различных групп цветов |             |             |             |              | $\Delta e$ ист. света |
|-------------------------|--|-------------|-------------|-------------|--------------|-----------------------|
|                         | №№ 1–14  | №№ 1–12     | №№ 1–8      | №№ 9–12     | №№ 13 и 14   |                       |
| <i>sRGB</i>             | 0,0458   | 0,0509      | 0,0262      | 0,1002      | 0,0156       | 0,0862                |
| <i>AdobeRGB</i>         | 0,0361   | 0,0410      | 0,0173      | 0,0886      | 0,0065       | 0,0278                |
| <i>DCI-P3 RGB</i>       | 0,0400   | 0,0443      | 0,0227      | 0,0877      | 0,0138       | 0,0626                |
| <i>MINIP1</i>           | 0,0325   | 0,0350      | 0,0176      | 0,0699      | 0,0177       | 0,0426                |
| <i>PAL/SECAM</i>        | 0,0445   | 0,0496      | 0,0249      | 0,0991      | 0,0141       | 0,0776                |
| <i>Wide Gamut RGB</i>   | 0,0279   | 0,0304      | 0,0134      | 0,0643      | 0,0130       | 0,0466                |
| <i>ProPhoto RGB</i>     | 0,0321   | 0,0367      | 0,0173      | 0,0757      | 0,0045       | 0,0095                |
| <b>Среднее значение</b> | <b>0,04</b>  | <b>0,04</b> | <b>0,02</b> | <b>0,08</b> | <b>0,012</b> | <b>0,05</b>           |

Таблица 4

Координаты цветности образцов МФП Kodak

| Цветовые пространства   | Усреднённое значение $\Delta e$ различных групп цветов |             |             |             |             | $\Delta e$ ист. света |
|-------------------------|--|-------------|-------------|-------------|-------------|-----------------------|
|                         | №№ 1–14  | №№ 1–12     | №№ 1–8      | №№ 9–12     | №№ 13 и 14  |                       |
| <i>sRGB</i>             | 0,0588   | 0,0650      | 0,0425      | 0,1099      | 0,0218      | 0,0366                |
| <i>AdobeRGB</i>         | 0,0653   | 0,0691      | 0,0506      | 0,1059      | 0,0426      | 0,0570                |
| <i>DCI-P3 RGB</i>       | 0,0622   | 0,0665      | 0,0492      | 0,1013      | 0,0361      | 0,0440                |
| <i>MINIP1</i>           | 0,0614   | 0,0627      | 0,0492      | 0,0895      | 0,0541      | 0,0427                |
| <i>PAL/SECAM</i>        | 0,0584   | 0,0644      | 0,0420      | 0,1091      | 0,0227      | 0,0346                |
| <i>Wide Gamut RGB</i>   | 0,0611   | 0,0627      | 0,0520      | 0,0840      | 0,0520      | 0,0460                |
| <i>ProPhoto RGB</i>     | 0,0730   | 0,0752      | 0,0644      | 0,0967      | 0,0598      | 0,0743                |
| <b>Среднее значение</b> | <b>0,06</b>  | <b>0,07</b> | <b>0,05</b> | <b>0,10</b> | <b>0,04</b> | <b>0,05</b>           |

цветов. Однако методик оценки цифровых систем на программном уровне, в принципе, ещё нет. Метод контрольных цветов применим, скорее, для передающих цветных систем. А для цифровых регистрирующих устройств разработаны цветовые шкалы и миры для профилирования, что не применимо на программном уровне.

За основу методики может быть взят колориметрический метод контрольных цветов. Однако: 1) следует расширить перечень контрольных цветов (насыщенных) жёлтого, зелёного и голубого, т.к. на точное воспроизведение именно этих оттенков наиболее реагирует зрительная система человека, в сравнении с красными и синими цветами; 2) необходимо иметь как минимум по 5 разных цветов на каждый основной цвет, т.к. равноконтрастные системы, в которых находят цветовые различия, не являются идеальными, и каждая привносит свои отклонения в цветовом пороге по каждому оттенку. Важно создать такую методику, где бы учитывались недостатки систем для об-

работки результата и были подобраны контрольные цвета с определённой периодичностью, к примеру с различием на 2 или 4 тона; 3) возможен также переход на такие атласы как *Pantone* и *RAL*, которые широко применяются в полиграфии и дизайне соответственно.

Подобная методика позволит тестировать МФП ещё на стадии разработки по спектральным характеристикам, а потом уже сравнивать расчётные данные с экспериментальными результатами на реальных образцах контрольных цветов.

В дальнейшем планируется провести исследования с выборкой по 24 контрольным цветам с МФП одного производителя, имеющими разные спектральные характеристики. Это позволит, в частности, провести более детальный анализ нелинейности цветных пространств. Кроме того, будет произведён расчёт цветового различия в *CIELAB* и учтена «интенсивность» спектральных характеристик МФП.

Координаты цветности образцов МФП *Agilent*

| Цветовые пространства   | Усреднённое значение $\Delta e$ различных групп цветов |             |             |             |             | $\Delta e$ ист. света |
|-------------------------|--|-------------|-------------|-------------|-------------|-----------------------|
|                         | №№ 1–14  | №№ 1–12     | №№ 1–8      | №№ 9–12     | №№ 13 и 14  |                       |
| <i>sRGB</i>             | 0,0557   | 0,0612      | 0,0368      | 0,1099      | 0,0232      | 0,0302                |
| <i>AdobeRGB</i>         | 0,0653   | 0,0683      | 0,0489      | 0,1071      | 0,0473      | 0,0699                |
| <i>DCI-P3 RGB</i>       | 0,0584   | 0,0621      | 0,0427      | 0,1010      | 0,0366      | 0,0493                |
| <i>MINIP1</i>           | 0,0650   | 0,0655      | 0,0507      | 0,0950      | 0,0624      | 0,0606                |
| <i>PAL/SECAM</i>        | 0,0558   | 0,0609      | 0,0367      | 0,1092      | 0,0254      | 0,0344                |
| <i>Wide Gamut RGB</i>   | 0,0616   | 0,0624      | 0,0500      | 0,0872      | 0,0569      | 0,0586                |
| <i>ProPhoto RGB</i>     | 0,0780   | 0,0799      | 0,0678      | 0,1041      | 0,0664      | 0,0848                |
| <b>Среднее значение</b> | <b>0,06</b>  | <b>0,07</b> | <b>0,05</b> | <b>0,10</b> | <b>0,05</b> | <b>0,06</b>           |

Таблица 6

Усреднённые значения по цветности МФП

| Цветовое пространство | МФП            | Значение $\Delta e_{uv}$ по группам образцов: |                               |            | Изменения $\Delta e_{uv}$ относительно показателей <i>Wide Gamut RGB</i> по группам образцов: |                              |            |
|-----------------------|----------------|---|-------------------------------|------------|---|------------------------------|------------|
|                       |                | средней насыщенности, №№ 1–8                  | большой насыщенности, №№ 9–12 | №№ 13 и 14 | средней насыщенности, № 1–8   | большой насыщенности, № 9–12 | №№ 13 и 14 |
| <i>sRGB</i>           | <i>Sony</i>    | 0,0262  | 0,1002                        | 0,0156     | 1,96  | 1,56                         | 1,20       |
|                       | <i>Kodak</i>   | 0,0425  | 0,1099                        | 0,0218     | 3,17  | 1,71                         | 1,68       |
|                       | <i>Agilent</i> | 0,0368  | 0,1099                        | 0,0232     | 2,75  | 1,71                         | 1,78       |
| <i>Adobe RGB</i>      | <i>Sony</i>    | 0,0173  | 0,0886                        | 0,0065     | 1,29  | 1,38                         | 0,50       |
|                       | <i>Kodak</i>   | 0,0506  | 0,1059                        | 0,0426     | 3,78  | 1,65                         | 3,28       |
|                       | <i>Agilent</i> | 0,0489  | 0,1071                        | 0,0473     | 3,65  | 1,67                         | 3,64       |
| <i>DCI-P3 RGB</i>     | <i>Sony</i>    | 0,0227  | 0,0877                        | 0,0138     | 1,69  | 1,36                         | 1,06       |
|                       | <i>Kodak</i>   | 0,0492  | 0,1013                        | 0,0361     | 3,67  | 1,58                         | 2,78       |
|                       | <i>Agilent</i> | 0,0427  | 0,1010                        | 0,0366     | 3,19  | 1,57                         | 2,82       |
| <i>MINIP1</i>         | <i>Sony</i>    | 0,0176  | 0,0699                        | 0,0177     | 1,31  | 1,09                         | 1,36       |
|                       | <i>Kodak</i>   | 0,0492  | 0,0895                        | 0,0541     | 3,67  | 1,39                         | 4,16       |
|                       | <i>Agilent</i> | 0,0507  | 0,0950                        | 0,0624     | 3,78  | 1,48                         | 4,80       |
| <i>PAL/SECAM</i>      | <i>Sony</i>    | 0,0249  | 0,0991                        | 0,0141     | 1,86  | 1,54                         | 1,08       |
|                       | <i>Kodak</i>   | 0,0420  | 0,1091                        | 0,0227     | 3,13  | 1,70                         | 1,75       |
|                       | <i>Agilent</i> | 0,0367  | 0,1092                        | 0,0254     | 2,74  | 1,70                         | 1,95       |
| <i>Wide Gamut RGB</i> | <i>Sony</i>    | 0,0134  | 0,0643                        | 0,0130     | 1   | 1                            | 1          |
|                       | <i>Kodak</i>   | 0,0520  | 0,0840                        | 0,0520     | 3,88  | 1,31                         | 4,00       |
|                       | <i>Agilent</i> | 0,0678  | 0,1041                        | 0,0664     | 5,06  | 1,62                         | 5,11       |
| <i>Pro Photo RGB</i>  | <i>Sony</i>    | 0,0173  | 0,0757                        | 0,0045     | 1,29  | 1,18                         | 0,35       |
|                       | <i>Kodak</i>   | 0,0644  | 0,0967                        | 0,0598     | 4,81  | 1,50                         | 4,60       |
|                       | <i>Agilent</i> | 0,0678  | 0,1041                        | 0,0664     | 5,06  | 1,62                         | 5,11       |

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Жбанова В.Л.* Системы цветоделения матричных фотоприёмников: монография. – Смоленск: Универсум, 2018. – 186 с. ISBN 978–5–91412–392–2.
2. *Домасев М.В., Гнатюк С.П.* Цвет, управление цветом, цветовые расчёты и измерения. – СПб.: Питер, 2009. – 224 с.
3. *Lyon R.F., Hubel P.M.* Eyeing the Camera: into the Next Century // IS&T Reporter «The window on imaging». – 2002. – Vol. 17, No. 6.
4. *Cepeda-Negrete J., Sanchez-Yanez R., Correa-Tome F., Lizarraga-Morales R.* Dark image enhancement using perceptual color transfer // IEEE Access. – 2018. – Vol. 6. – P. 14935–14945. DOI: 10.1109/ACCESS.2017.2763898.
5. *Ложкин Л.Д., Осипов О.В., Вороной А.А.* Цветокоррекция в трёхцветных устройствах цветообразования // Оптический журнал. – 2017. – Т. 41, № 1. – С. 88–94. DOI: 10.18287/2412–6179–2017–41–1–88–94.
6. *Gao H., Zeng W., Chen J.* An improved gray-scale transformation method for pseudo-color image enhancement // Computer Optics. – 2019. – Vol. 43, No. 1. – P. 78–82. DOI: 10.18287/2412–6179–2019–43–1–78–82.14.
7. *Канаева И.А., Болотова Ю.А.* Методы коррекции цвета и яркости при создании панорамных изображений // Оптический журнал. – 2018. – Т. 42, № 5. – С. 885–897. DOI: 10.18287/2412–6179–2018–42–5–885–897.
8. *Zhbanova V.L.* Research into methods for determining colour differences in the CIELAB uniform colour space // Light & Engineering. – 2020. – Vol. 28, No. 3. – P. 53–59.
9. *Zhbanova V.L., Parvuyusov Yu. B.* Experimental investigation of the color-separation system of photodetector array // Journal of Optical Technology. – 2019. – Vol. 86, No. 6. – P. 177–182. DOI (CrossRef): 10.1364/JOT.86.000177.
10. *Zhbanova V.L., Nubin V.V.* A method of improving colour rendition of digital photo- and videocameras // Light & Engineering. – 2014. – Vol. 22, No. 2. – P. 84–89.
11. *Кривошеев М.И., Кустарёв А.К.* Цветовые измерения. – М.: Энергоатомиздат, 1990. – 240 с.
12. CIE publication 116: 1995 «Industrial color difference evaluation».
13. CIE publication 135/2:1999 «Colour rendering (TC1–33 closing remarks)».
14. ГОСТ 7721–89 «Источники света для измерений цвета. Типы. Технические требования. Маркировка».



**Жбанова Вера Леонидовна**, кандидат техн. наук. Окончила в 2011 г. МЭИ (ТУ) по специальности «Опτικο-электронные приборы и системы». Доцент кафедры оптикоэлектронных систем филиала НИУ «МЭИ» в Смоленске. Область научных интересов: колориметрия, обработка цифровых изображений, приёмники излучения, 3D-проектирование

### Решения МСК «БЛ ГРУПП» для внутреннего освещения применены на крупном приборостроительном предприятии в Смоленске

Светильники GALAD «Кайро LED» – одно из самых энергоэффективных решений «БООС ЛАЙТИНГ ГРУПП» для внутреннего освещения помещений различного назначения – установлены на производственной площадке АО «НПП «Измеритель» в Смоленске.

В ходе технического перевооружения и реконструкции сборочно-монтажного и испытательного производства потребовалось качественно изменить уровень внутреннего освещения, для чего и была выбрана продукция МСК «БЛ ГРУПП».

Ключевые особенности GALAD «Кайро LED» – высокие световой поток и световая отдача (не менее 110 лм/Вт), необходимые для решения задач освещения рабочих пространств. Высокое качество света (индекс Ra более 80) положительно влияет на эффективность труда, а надёжный стальной корпус важен с точки зрения безопасности.

bl-g.ru  
26.08.2020

### 5 тысяч светильников со светодиодами сэкономят 15 млн бюджетных рублей

Специалисты СПб ГБУ «Ленсвет» продолжают замену оставшихся в обслуживании устаревших уличных светильников с ртутными лампами «ДРЛ» на новые со светодиодами.

С начала 2020 г. на улицах, переулках, территориях жилых массивов Петродворцового, Курортного, Выборгского (Парголово, Левашово), Пушкинского, Колпинского и Красносельского районов города установлено 5113 современных светильников со светодиодами. В Выборгском районе (в Парголово, Левашово и Осиновой роще) светильники с «ДРЛ» полностью исключены из эксплуатации. Экономное потребление электроэнергии современными светильниками до конца 2020 г., за четыре месяца, обойдётся бюджету города на 15 млн рублей дешевле. Осталось заменить 5645 единиц устаревшего осветительного оборудования.

Современные светильники практичны, экологичны, долговечны. По предварительным расчётам, вложенные в светильники со светодиодами средства окупятся за 2 года.

lensvet.spb.ru/  
31.08.2020

### Новая технология позволяет получать аттосекундные импульсы света при помощи обычного промышленного лазера

Группа исследователей из университета Центральной Флориды разработала новый метод, позволяющий получать импульсы света, длительность которых исчисляется аттосекундами (1 ас =  $10^{-18}$  с), используя на входе свет, вырабатываемый обычным лазером промышленного назначения. Данное достижение открывает возможность производить фиксацию событий и делать измерения с аттосекундной точностью, что, в свою очередь, позволит учёным из самых разных областей науки изучать сверхбыстрые явления и процессы, такие, как движение электронов в атомах или молекулах в их естественных временных рамках, ведь «сцена действия на аттосекундах – это отдельные атомы, а сюжетом служит их внутренняя жизнь».



daillytechinfo.org/  
02.09.2020

# Расчёт теплового менеджмента уличных светильников со светодиодами

М. С. СЕНГИЗ, С. ЙЕТКИН

Университет Битлис Ерен, Битлис, Турция  
E-mail: msaitcengiz@gmail.com, syetkin@beu.edu.tr

## Аннотация

В этой работе было проведено имитационное исследование потери эффективности, вызванной теплом, выделяемым светодиодными чипами. Изменение температуры светодиодного светильника было проанализировано для трёх различных сценариев с использованием метода конечных элементов. Была предпринята попытка предотвратить выход светодиодов из строя из-за повышения температуры светильника путём нагнетания воздуха внутрь самого светодиодного светильника. Для этого в имитационной среде был предложен метод пассивного охлаждения. Соответственно, в мощных светодиодных светильниках высокий выход тепла, излучаемого светодиодными чипами, сводится к низким количествам с помощью воздушного потока. Таким образом, достигается эффективность на выходе светодиода.

**Ключевые слова:** светодиодное освещение, температура на светодиоде, тепловой анализ, энергоэффективность.

## 1. Введение

Светодиодная технология (на основе светоизлучающего диода), которая позволяет реализовывать эффективное освещение с меньшим потреблением энергии, предпочтительна из-за её особенностей, таких как высокая световая отдача (лм/Вт), хорошая цветопередача, различные варианты цвета и длительный срок службы. Кроме того, по мере развития полупроводниковых технологий эффективность светодиодов постоянно растёт. Однако, значения световой отдачи справедливы для экспериментальных исследований светодиодных чипов в лабораторных условиях. Известно, что изменение температуры влияет на световой поток и срок службы светодиодов гораздо сильнее, чем на традиционные источники света. При превышении оптимальных рабочих

температур скорость деградации светодиодов увеличивается, световой поток уменьшается, а цветовые характеристики становятся хуже. В результате этой ситуации высокая световая отдача (лм/Вт), заявленная производителями как основное преимущество светодиодных светильников, уменьшается из-за снижения эффективности светодиодов. Поэтому осветительные установки с использованием неэффективных светодиодных светильников встречаются во многих сферах применения [1–5].

По данным Объединения твердотельных осветительных систем и технологий (*Alliance for Solid-State Illumination Systems and Technologies, ASSIST-2005*) для измерения светодиодных чипов требуется в общей сложности 6000 часов работы светодиодов. Первый 1000-часовой срок службы измерения не включается в расчёты, используются последние 5000 часов 6000-часового измерения. Для того чтобы измерить температурный режим светодиода согласно *ASSIST-2005*, рекомендуется проводить измерения путём подключения измерительного устройства (термопары) к точке пайки, если это возможно. *ASSIST* определяет температуру точки пайки как 45, 65 и 85 °C для мощных светодиодных чипов с током питания более 100 мА. Значения светового потока, полученные в конце первых 1000 часов измерений, нормируются как 100 %. По истечении 6000 часов изменение светового потока сравнивается со значением, полученным после первых 1000 часов. Публикации *ASSIST* описывают структуру измерений срока службы светодиодов, хотя использование некоторых методов измерений и расчёта необязательно в полной мере [6].

## 2. Параметры светильников со светодиодами

Сегодня мы живём в период, когда энергоэффективность очень важна. С увеличением численности населе-

ния потребление энергии растёт все время. По этой причине от неэффективных методов, приводящих к потреблению энергии, отказываются и ищут эффективные методы. С этой целью опробовано множество энергоэффективных методов как для улучшения эксплуатационных показателей, так и для автоматизации и интеллектуального освещения. Главная цель здесь – это более эффективное использование энергии. По этой причине был проведён поиск решений проблем светодиодов, обеспечивающих энергоэффективность освещения [7–14].

Поскольку эффективность источника света зависит от температуры в светодиодных светильниках, очень важен предварительный тепловой анализ. Параметрами, влияющими на тепловую конструкцию светодиодного светильника, являются материал корпуса светильника, печатная плата, материал теплопроводящих промежуточных наполнителей (например, термопасты), тепловая мощность светодиода и температура окружающей среды.

Анализ температурного режима в светильниках со светодиодами проводится как для печатной платы, на которой установлен светодиодный чип, так и для корпуса светильника. Потому что тепло, выделяемое светодиодным чипом, накапливается в корпусе светодиодного модуля из-за печатной платы. Для того чтобы тепло внутри корпуса светодиодной конструкции отводилось наружу, тепловое сопротивление должно быть минимальным. Эффективность напрямую зависит от правильного теплового менеджмента светильника, особенно того, в котором используются мощные светодиоды. Для анализа температурного режима работы светильника необходимо знать теплофизические свойства таких элементов, как светодиодный чип, термопаста, печатная плата, материал корпуса самого светильника. В результате для того, чтобы достичь оптимального значения эффективности светильника, которая позволяет выполнять требуемые критерии освещённости, необходимо подобрать оптическую систему в соответствии с выполняемой задачей и оптимизировать тепловой менеджмент.

Механизмы теплопередачи светодиодов отличаются от других источников света. Традиционные источники света обычно передают генерируемое тепло в окружающую среду посред-

Виды теплопередачи различных источников света

| Тип источника света                       | Излучение (%) | Конвекция (%) | Теплопроводность (%) |
|---|---------------|---------------|----------------------|
| Лампа накаливания                         | > 90          | < 5           | < 5                  |
| Люминесцентная лампа                      | 40            | 40            | 20                   |
| Газоразрядные лампы высокой интенсивности | > 90          | < 5           | < 5                  |
| Светодиод                                 | < 5           | < 5           | > 90                 |

ством излучения. Однако светодиоды передают тепло, которое они производят, с помощью теплопроводности. Это отличие требует поиска принципиально других решений при проектировании систем для работы со светодиодами. Для отвода тепла, генерируемого светодиодами, требуется «тепловой» путь. Поэтому проблема теплопроводности должна быть решена в конструкции светильника. Такие недостатки, как деградация люминофорного слоя, повреждение линз и разрушение пайки, встречаются при высокотемпературном воздействии в светодиодных модулях [15]. В своём исследовании по охлаждению светодиодов в 2006 году Джеймс Петроски сравнил традиционные источники света со светодиодными по их теплопередающим свойствам [16]. В табл. 1 приведены типы теплопередачи для источников света [17].

В данной работе были исследованы изменения свойств светодиодных источников света с изменением температуры. С этой целью для уличного светодиодного светильника для освещения дорог был проведён анализ температурного режима и расчёт методом конечных элементов в имитационной среде.

### 3. Тепловой расчёт светодиодного модуля

Тепло, выделяемое в светодиодах, влияет на их эффективность. По мере того, как ток драйвера, поступающий на светодиодный чип, увеличивается, электрическая мощность и световой поток растут. Однако по мере роста электрической мощности, также увеличивается выделение тепла. Поэтому для светодиодов, работающих на больших токах, требуются более широкие поверхности для отвода тепла, за счёт этого температура может быть снижена. Ведь эффективность светодиода уменьшается с повышением температуры. Большая часть тепла, производимая светодиодами, отводится через печатную плату на корпус светодиодного модуля или воздух внутри него. Это основные пути теплопередачи. Например, в мощных светодиодах теплопроводящая подложка основы корпуса выполнена из металла для того, чтобы эффективно отводить тепло в окружающий воздух. Кроме того, для снижения температуры светильника используются тепло-

проводящие промежуточные наполнители (термопаста или термогель), за счёт которых отводится накопленной тепло и снижается температура соединений. Каждое соединение в конструкции светодиодного модуля должно быть выполнено с помощью пайки или заполнено теплопроводящим гелем или пастой. Чем выше теплопроводность этих тепловых промежуточных наполнителей, тем легче отводится тепло от светодиодов.

Параметры исследуемого температурного режима светильника приведены ниже [1–7]:

- температура окружающей среды: тепло от светодиодного чипа передаётся на корпус светодиодной конструкции (модуля) и рассеивается в окружающее пространство. Повышение температуры в светильнике приводит к тому, что срок службы светодиодов сокращается и они выходят из строя. Тепло, накопленное в корпусе светодиодного модуля, остаётся в нём, тем самым повышая температуру соединения. Для этого исследования температура окружающей среды в светильнике была выбрана равной 22 °С;

- тепловая мощность светодиодных чипов: часть электрической энергии в светодиодных чипах превращается в световую энергию, остальная часть выделяется в виде тепла. Для того чтобы светодиоды работали эффективно, это тепло должно быть отведено от них. Увеличение тепловой мощности светодиодного чипа увеличивает температуру *p-n*-переходов. В частности, температура *p-n*-перехода в светодиодных чипах, питаемых выше их номинальных токов, становится неблагоприятной с увеличением тепловой мощности. Известно, что высокая температура негативно влияет на эффективность светильников и срок службы светодиодов;

- материал корпуса светильника: существует несколько типов матери-

алов, позволяющих эффективно рассеивать тепло от светодиодов в окружающее пространство, за счёт этого свойства может быть снижена температура *p-n*-перехода. В этом исследовании в качестве материала корпуса для моделирования был выбран алюминий;

- печатная плата: печатные платы – это поверхность, на которой припаяны светодиоды или другие элементы, с помощью них на светодиоды поступает питающий ток от драйвера, поэтому происходит нагрев печатных плат;

- теплопроводящий промежуточный наполнитель: основное назначение теплопроводящего промежуточного наполнителя заключается в заполнении зазоров между соединяемыми поверхностями и предотвращении высоких температур, которые будут создаваться воздушными зазорами.

Именно по вышеописанным причинам рассматриваемые параметры важны для анализа температурного режима светильника. Причём тепловая мощность светодиодного чипа – это фактор, оказывающий наибольшее влияние на температуру *p-n*-перехода. Поэтому моделирование в программе *Ansys* проводилось в соответствии с этим подходом.

### 4. Моделирование и анализ эффективности

Тепловой менеджмент зависит от температуры *p-n*-перехода светодиодов. Известно, что световой поток уменьшается с повышением температуры на светодиодах. В каталогах по светодиодным чипам обычно указывается световой поток для температуры *p-n*-перехода при окружающей температуре 25 °С. Эти значения (которые также называются в литературе «холодным» световым потоком) являются значениями светового по-



Таблица 2

Свойства материалов, используемых в сценарии (A1 – P1)

| Материалы для моделирования | Плотность, кг/м <sup>3</sup> | Изотропная теплопроводность, Вт/(м·°C) | Удельная теплоёмкость, Дж/(кг·°C) |
|-----------------------------|------------------------------|--|-----------------------------------|
| Полиэтилен                  | 950                          | 0,28                                   | 950                               |
| Алюминий                    | 2689                         | 237,5                                  | 951                               |

Рис. 1. Изображение светодиодного модуля для сценария (A1 – P1) безвоздушного потока, вид спереди (а), вид слева (б), вид снизу (в) и общий вид (г)

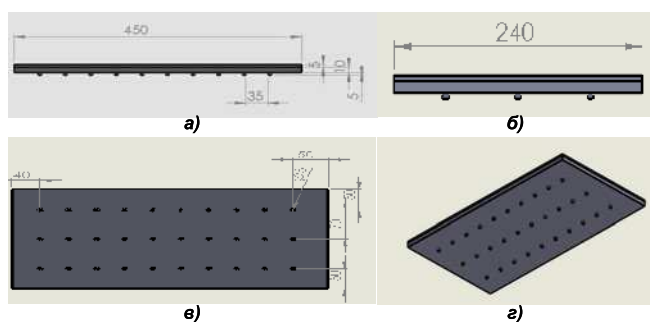
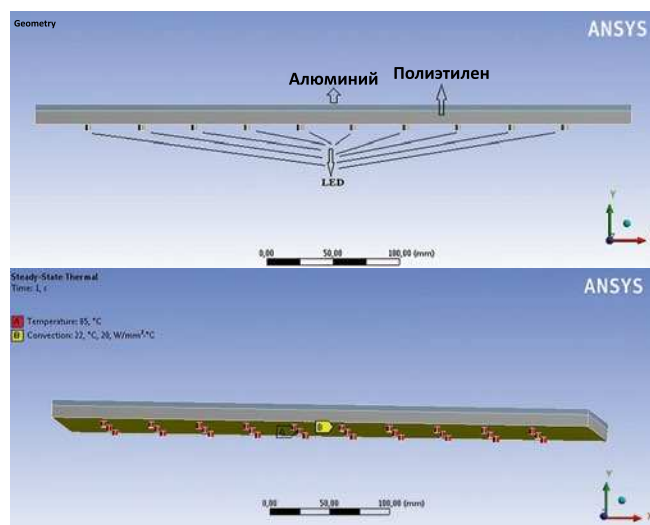


Рис. 2. Расчёт модуля в программе Ansys для безвоздушного сценария (A1 – P1)



тока, полученными в результате импульсных токов в диапазоне 10 и 20 мс, которые подаются на ленту при производстве светодиодов [18]. При этих измерениях светодиоды работают очень короткое время, и, соответственно, повышение температуры *p-n*-перехода не наблюдается. Светодиоды, измеренные до достижения теплового равновесия, показывают более низкую эффективность в реальных условиях эксплуатации [19]. При разработке светильника для расчёта светового потока, который будет приближён к реальным значениям, температуру *p-n*-перехода обычно принимают 85 °C. В данном исследовании начальная температура светодиодного светильника была смоделирована согласно температуре *p-n*-перехода при температуре окружающей среды 22 °C и для случая с максимальной температурой *p-n*-перехода при

85 °C. Предполагается, что моделируемый светодиодный светильник работает идеально и эксплуатируется в диапазоне температур 22–85 °C. Принимаем этот светильник со светодиодами за безотказный качественный осветительный прибор. При моделировании прибора, светильник и источник света оценивались как единое целое. Благодаря моделированию можно легко оценить внутреннюю температуру на корпусе светодиодного модуля или температуру *p-n*-перехода, что облегчает оценку светотехнических и цветовых характеристик светодиодов, используемых при этой температуре. Для анализа температуры *p-n*-перехода и теплового менеджмента в данном исследовании использовалась программа Ansys. Предполагается, что тепло, выводимое от электронного элемента, выходит из точки *p-n*-перехода. При

моделировании считается, что часть тепла уходит вниз на печатную плату, а часть вверх в окружающую среду или на охлаждающий блок.

#### 4.1. Сценарии моделирования

В качестве уличного светильника со светодиодами была выбрана конструкция, состоящая из 2-слояного полиэтилена и алюминия. На поверхности полиэтилена расположено 30 светодиодных чипов. Толщина полиэтиленовой поверхности составляет 1 см. Верхняя охлаждающая поверхность имеет толщину 0,5 см (алюминий). Предполагая, что каждый светодиодный чип излучает температуру 85 °C, моделируются соответствующие граничные условия. Согласно моделированию с использованием метода конечных элементов, между этими двумя поверхностями нет воздушного зазора, так как это пространство заполняется термопастой или термогелем.

На рис. 1 представлен первый сценарий (A1 – P1) для расчёта светодиодного модуля, согласно которому пространство между поверхностями отсутствует (0 см) без воздушного потока.

На рис. 2 представлен расчёт в программе Ansys для безвоздушного сценария (A1 – P1), в котором участвуют два материала, из которых состоит модуль, а именно полиэтилен и алюминий. Свойства используемых материалов в первом сценарии (A1 – P1) приведены в табл. 2 [15].

Во втором рассматриваемом сценарии (A2 – P2) расстояние между поверхностями, полиэтиленовой и алюминиевой пластинами, составляет 0,5 см, также без воздушного потока. Периферия воздушного зазора между двумя поверхностями замкнута, так что воздушный поток отсутствует. В этой конструкции воздух проявляет изолирующий эффект, как при установке двойного стеклопакета. На рис. 3 представлен смоделированный светодиодный модуль для второго сценария с расстоянием между поверхностями 0,5 см. На рис. 4 представлен расчёт в программе Ansys получившейся трехэтажной конструкции для второго сценария (A2 – P2) с зазором между алюминием и полиэтиленом 0,5 см. Обратим внимание, что в этой конструкции нет воздушного потока. Свойства используемых мате-

Свойства материалов, используемых в сценарии (A2 – P2) и (A3 – P3)

| Материалы для моделирования | Плотность, кг/м <sup>3</sup> | Изотропная теплопроводность, Вт/(м·°C) | Удельная теплоёмкость, Дж/(кг·°C) |
|-----------------------------|------------------------------|--|-----------------------------------|
| Полиэтилен                  | 950                          | 0,28                                   | 950                               |
| Алюминий                    | 2689                         | 237,5                                  | 951                               |
| Воздух                      | 1,1614                       | 0,026                                  | 1007                              |

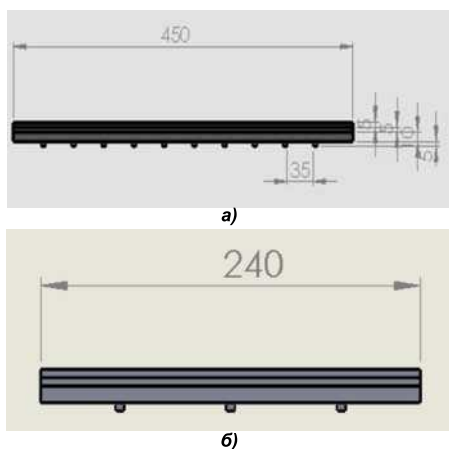


Рис. 3. Изображение светодиодного модуля для сценария (A2 – P2) безвоздушного потолка, вид спереди (а) и вид слева (б)

риалов во втором сценарии представлены в табл. 3.

Если положить, что все свойства материалов конструкции, представленной на рис. 4 равны значениям из табл. 3, то третий рассматриваемый сценарий (A3 – P3) расчёта будет при наличии воздушного потока между двумя пластинами с зазором 0,5 см.

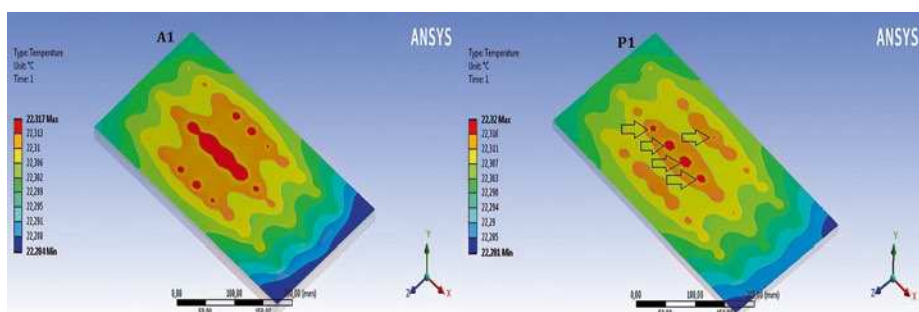
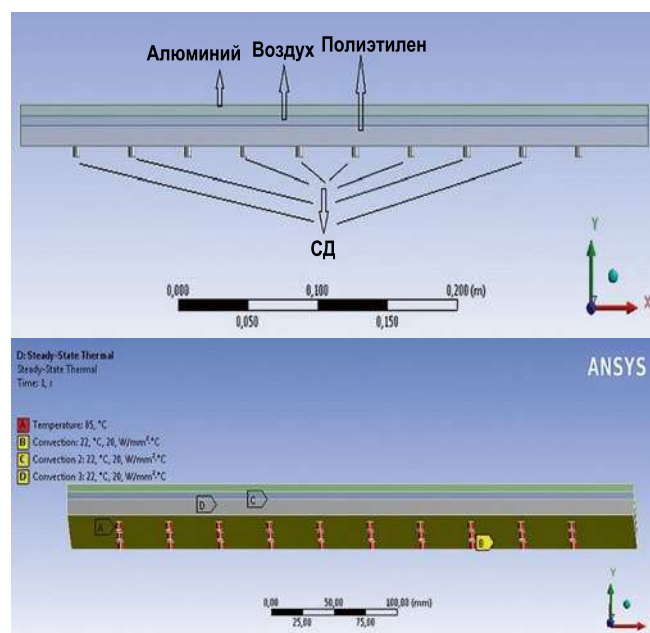
#### 4.2. Анализ эффективности моделирования

В данном исследовании анализируются три сценария теплового режима работы светодиодного модуля, а именно:

- расстояние между поверхностями 0 см без воздушного потока (A1 – P1);
- расстояние между поверхностями 0,5 см без воздушного потока (A2 – P2);
- расстояние между поверхностями 0,5 см с воздушным потоком (A3 – P3).

Моделирование было проведено с помощью метода конечных элементов. Результаты теплового расчёта для верхнего слоя алюминия (A1, A2, A3) и нижнего слоя полиэтиленовой поверхности (P1, P2, P3) представлены на рисунках ниже. На рис. 5 представлены результаты теплового расчёта в программе *Ansys* для первого сценария (A1 – P1).

Как можно увидеть из рис. 6, если есть воздушный зазор 0,5 см между верхней алюминиевой и нижней полиэтиленовой поверхностями, то тепло поднимается довольно быстро. Даже при том, что по условию второго сценария воздушного потока

Рис. 4. Расчёт модуля в программе *Ansys* для безвоздушного сценария (A2 – P2)Рис. 5. Результаты теплового расчёта в программе *Ansys* для сценария (A1 – P1)

в зазоре 0,5 см нет, граничное значение 22 °C на полиэтиленовой пластине нарушается, и температура растёт даже через 1 с. Так в сценарии (A2 – P2) наблюдалось, что температура достигала значения 22,46 °C в течение 1 с на алюминиевой пластине и значения 26,22 °C на полиэтиленовой пластине. Другими словами, независимо от порогового значения температуры, сработала теплоизоляция от воздушного пространства. Следовательно, такую конструкцию использовать не следует.

Из рис. 7 видно, что, если есть зазор между верхней алюминиевой и нижней полиэтиленовой поверх-

ностями 0,5 см с воздушным потоком, то количество тепла не увеличивается. Поскольку воздушный поток циркулировал в пространстве между пластинами, полиэтиленовая пластина подвергалась меньшему тепловому воздействию. При моделировании максимальная температура поднялась до значения 22,02 °C. В условиях, представленных на рис. 6, видно, что температура не будет повышаться на корпусе светильника при наличии воздушного потока. Пассивный метод охлаждения может быть использован для предотвращения нагрева светильников со светодиодами. Эту ситуацию можно увидеть на рис. 7. При усло-

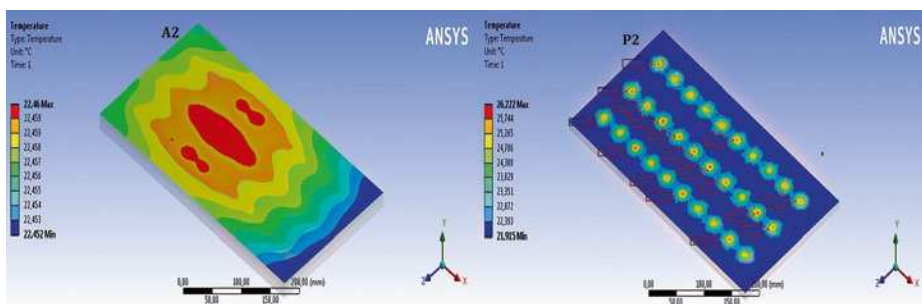


Рис. 6. Результаты теплового расчёта в программе Ansys для сценария (A2 – P2)

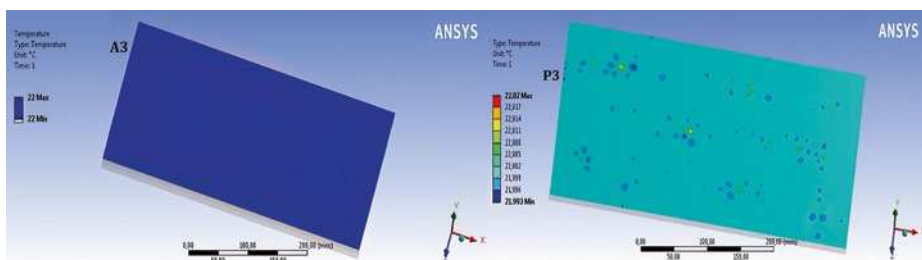


Рис. 7. Результаты теплового расчёта в программе Ansys для сценария (A3 – P3)

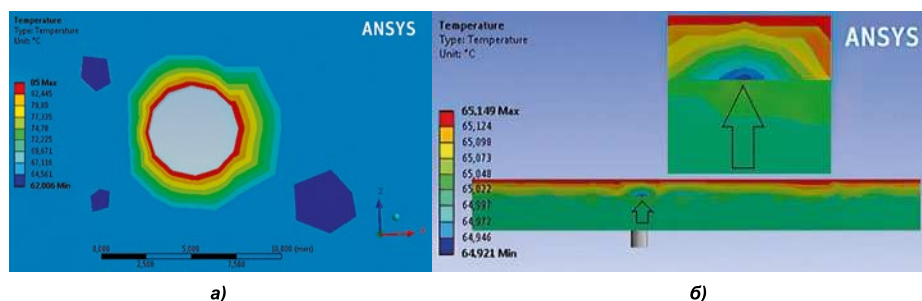


Рис. 8. Результаты теплового расчёта для светодиодного чипа вид сверху (а) и сбоку (б) для граничных условий температуры 65 °С

Рис. 9. Результаты теплового расчёта для передней части светильника для граничных условий температуры 65 °С

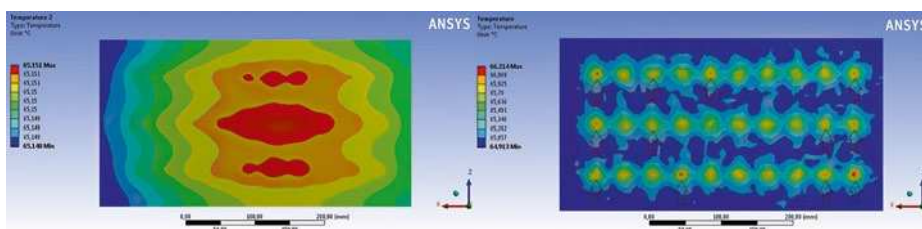
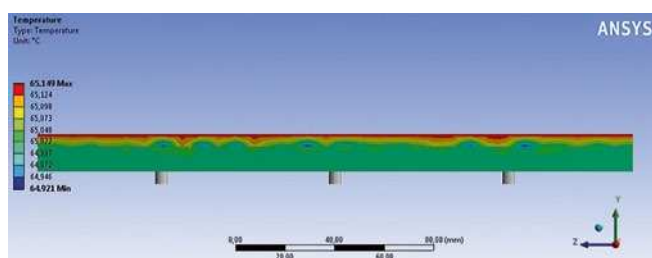


Рис. 10. Результаты теплового расчёта для сценария (A2 – P2) при температуре воздуха внутри корпуса 65 °С

вии соблюдения стандартов защиты от влаги и пыли светильник со светодиодами из сценария (A3 – P3), подверженный воздействию воздушных потоков, нагрев предотвращается. Из рис. 7 также видно, что алюминиевая поверхность не нагревается, и ни один

светодиод на поверхности полиэтилена не превышает порогового значения. Каким бы ни был зазор, он не изолирует воздух. Наоборот, за счёт него появляется воздушное охлаждение. В этом отношении вместо алюминия на верхней охлаждающей поверхно-

сти можно использовать более дешёвые материалы.

## 5. Результаты и обсуждения

При анализе рассмотренных сценариев было доказано, что наличие слоя воздушного зазора приводит к повышению температуры. Так воздушный зазор выполнял функцию теплоизоляции. Поэтому между алюминиевым слоем и полиэтиленовым слоем в светильниках со светодиодами не должно быть воздуха. Для этого следует использовать термопасту или термогоель.

Как видно на рис. 5, пять светодиодов в центре имели превышающие пороговые значения температуры через 1 с. При этом, между алюминиевой и полиэтиленовой пластинами нет воздушного зазора. Понятно, что алюминиевый слой позволяет осуществлять достаточное охлаждение для отвода тепла.

Однако на рис. 6, пока воздух находится в закрытой зоне между алюминиевой теплопроводящей поверхностью и поверхностью полиэтилена, охлаждение не происходит. Потому что воздух – это очень хороший изоляционный материал. Если поток воздуха не возникает, то есть если воздух внутри неподвижен, то видно, что полиэтиленовая пластина подвергается большему нагреву. Как видно на рис. 6, 17 светодиодов превысили пороговое значение температуры, указанное в моделировании, за 1 с. По мере того, как светодиодный модуль работает, температура будет продолжать увеличиваться, и понятно, что будут достигнуты температуры, которые ухудшат работу светодиода, независимо от порогового значения температуры.

Моделирование было также проведено для температуры 65 °С, которая указана в стандартах ASSIST. Так пороговое значение температуры для расчёта в тех же условиях, что представлены на рис. 6, то есть в замкнутой области, было установлено на уровне 65 °С. Рис. 8 показывает верхнее и боковое тепловыделение для светодиодного чипа.

Как видно на рис. 9, когда температура воздуха внутри корпуса рассматриваемого СД модуля составляет 65 °С, происходит нагрев теплопроводящей алюминиевой поверхности. Из-за изоляции воздуха в закрытой зоне температура превышает пороговое

значение за 1 с. И так, как только светодиоды заработали, начался нагрев. Это показывает, что температура будет увеличиваться с течением времени. Поскольку воздух находится в закрытом пространстве, он не передаёт тепло наружу, возникает эффект двойного стеклопакета. Тепло, выделяемое светодиодами чипами, увеличивается на полиэтиленовом слое и приводит к выходу светодиодов из строя. Воздух создаёт теплоизоляцию для алюминиевой поверхности, поэтому алюминий не может отводить тепло. На рис. 9 представлено распределение тепла передней части светодиодного светильника.

На рис. 10, видно, что алюминиевая поверхность нагревается гораздо больше при температуре воздуха в помещении 65 °С. Однако присутствует эффект воздушной изоляции, поэтому скорость теплопередачи уменьшается. Соответственно, видно, что 12 светодиодных чипов за 1 с превышают граничное значение 65 °С. Очевидно, что со временем эта температура будет слишком сильно повышаться и приводить к выходу из строя светодиодов. На рис. 10 показано распределение температуры на алюминиевой и полиэтиленовой пластинах для сценария (A2 – P2) (температура воздуха внутри корпуса 65 °С).

## 6. Заключение

Основными факторами, влияющими на температуру *p-n*-перехода, являются температура окружающей среды и тепловая мощность светодиодного чипа.

В этом исследовании светодиодные чипы нагревают поверхность полиэтилена и воздух внутри светильника. Поэтому светодиодные чипы на поверхности полиэтилена, которые становятся слишком горячими, разрушаются. Если нет движения воздушного потока через воздушный зазор между слоями, то воздух действует как изолятор, что приводит к повышению температуры. Поэтому между алюминиевыми и полиэтиленовыми пластинами не должно быть зазора. Если есть зазор, нагрев можно предотвратить с помощью его заполнения термопастой или термогелем.

Кроме того, тепло можно уменьшить, применяя пассивное охлаждение в светодиодных конструкциях. Его можно обеспечить за счёт создания

воздушного потока в зазорах. Такая ситуация иллюстрируется при моделировании сценария (A3 – P3) на рис. 7.

Тепловая мощность светодиодного чипа является наиболее важным параметром, влияющим на эффективность. По мере увеличения тепловой мощности светодиодного чипа количество выделяемого тепла увеличивается. Если рассматривать устройство светодиода в качестве целостной системы, тепло, излучаемое светодиодным чипом, передаётся на корпус светодиодной конструкции, а затем отводится в окружающее воздушное пространство. Повышение тепла на корпусе светодиодной конструкции (модуля) в закрытом внутреннем пространстве вызывает его выход из строя. Эту ситуацию можно увидеть из результатов расчёта сценария (A2 – P2) на рис. 6 и рис. 10.

Как основной вывод из вышеизложенного, в мощных светильниках со светодиодами важен каждый из рассмотренных параметров.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ:

1. *Yurtseven M.B., Mete, S. ve Onaygil, S.* The effects of temperature and driving current on the key parameters of commercially available, high-power, white LEDs // *Lighting Research and Technology*, 2016. V48, #8, pp. 943–965.
2. *Jayawardena A., Liu Y. Narendran N.,* Analysis of three different junction temperature estimation methods for AC LEDs // *Solid State Electronics*, 2013. V86, pp. 11–16.
3. *Yurtseven M.B.* LED Işık Kaynaklı Armatür Isıl Modellenmesi ve Isıl Tasarımı Etkileyen Faktörlerin İstatistiksel Analizi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Enerji Enstitüsü, Doktora Tezi, Haziran 2017.
4. *Yurtseven M.B., Onaygil S. Oğus G.* Thermal simulation and validation of LED based luminaires using two-resistor compact thermal model // *Lighting Research and Technology*, 2014. V46, #5, pp. 576–586.
5. *Cengiz M. S.* Thermal Design Calculations for LED Luminaires // *International Journal of Engineering Research and Development*, 2018. V10, #2, pp. 69–75.
6. ASSIST Assist Program. 2020, <http://www.lrc.rpi.edu/programs/solidState/ASSIST/index.asp>
7. *Çibuk M. Cengiz M.S.,* Determination of Energy Consumption According To Wireless Network Topologies In Grid-Free Lighting Systems // *Light & Engineering*, 2020. V28, #2, pp. 67–76.
8. *Çibuk M.* Reducing Energy Consumption in Single-Hop and Multi-Hop Topologies of Road Lighting Communication Network // *Light & Engineering*, 2020. V28, #4.

9. *Efe S. B.* UPFC Based Real-Time Optimization of Power Systems for Dynamic Voltage Regulation. // *Computer Modeling in Engineering & Sciences*, 2018. V116, #3, pp. 391–406.

10. *Efe S. B., Cebeci M.,* Power Flow Analysis by Artificial Neural Network. // *International Journal of Energy and Power Engineering*, 2013. V2, #6, pp. 204–208.

11. *Cengiz M. S.* Simulation and Design Study for Interior Zone Luminance In Tunnel Lighting. // *Light & Engineering*, 2019. V27, #2, pp. 42–51.

12. *Cengiz M. S.* Effects of Luminaire Angle and Illumination Topology On Illumination Parameters In Road Lighting. // *Light & Engineering*, 2020. V28, #4.

13. *Cengiz M. S., Cengiz Ç.* Numerical Analysis of Tunnel LED Lighting Maintenance Factor. // *IJUM Engineering Journal*, 2018. V19, #2, pp. 154–163.

14. *Cengiz M. S.* The Relationship between Maintenance Factor and Lighting Level in Tunnel Lighting. // *Light & Engineering*, 2019. V27, #3, pp. 75–88.

15. *Poppe A. Lasance C.J.* On the standardization of thermal characterization of LEDs. // *Semiconductor Thermal Measurement and Management Symposium, 2009* 25th Annual IEEE, 15–19 Mart 2009, San Jose, CA, ABD.

16. *Petroski J.* Thermal Challenges In LED Cooling. 2020, <https://www.electronics-cooling.com/2006/11/thermal-challenges-in-led-cooling/>

17. ANSYS: Engineering Simulation & 3D Design Software, <https://www.ansys.com/>, 2020.

18. Oms Lighting (2014). Cold lumens versus hot lumens. <http://www.omslighting.com/ledacademy/5794-leds-controls/41-coldlumens-versus-hot-lumens>

19. *Ateş S., Yurtseven M.B., Onaygil S.* Design Of A Chip On Board (COB) LED Based Industrial Luminaire With Thermal Simulations. // *Light & Engineering*, 2019. V27, #2, pp. 78–87.



**Мехмет Саид Сенгуз (Mehmet Said Cengiz), Ph.D.** (2016 г.). Работает в Университете Битлис Ерен, Турция. Область научных интересов: прикладные вопросы освещения



**Седа Йеткин (Seda Yetkin), MSc.** (2017 г.). Аспирант в Университете Фират на кафедре машиностроения. Работает преподавателем в Университете Битлис Ерен, Турция

# Расчёт оптимального угла наклона для выработки максимальной энергии от солнечной панели с использованием моделей ясного неба и интенсивности падающих лучей<sup>1</sup>

М.А. ЗАХИД<sup>1,2</sup>, Г.Т. ЧАВАН<sup>1</sup>, Я. Х. ЧО<sup>1</sup>, ДЖ. Ы<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Колледж информации и коммуникации, Университет Сонгюнган (SKKU), Сувон, Корея

<sup>2</sup>Кафедра электротехники, Университет инженерии и технологии, Таксила, Пакистан

Email: aleem12394@skku.edu

## Аннотация

В этой статье были проанализированы и внедрены модели представления ясного неба и интенсивности падающих лучей для достижения максимальной электроэнергии, производимой солнечной (фотоэлектрической, далее ФЭ) панелью. Выбранные модели включают не только параметры, зависящие от местоположения, но и факторы окружающей среды, такие как мутность Линке (включая аэрозоли, поглощение из-за различных газов, рассеяние Рэлея), облачный покров, альbedo, заметные водяные пары. ФЭ панель мощностью 250 Вт была использована в качестве эталона для проверки выходной электроэнергии для данного положения, заданного широтой и долготой местоположения. Показано, что угол наклона панели 27°, ориентированный на юг, является оптимальным для каждого рассмотренного местоположения. Например, для положения Нагпур, Индия (21,14° с.ш., 79,08° в.д.) разница вычисленной электроэнергии с фактической, полученной с помощью пиранометров, пиргелиометров и люксметров, установленных Национальной лабораторией возобновляемых источников энергии (NREL, The National Renewable Energy Laboratory), составляет всего 0,35 %. Таким образом, величина электроэнергии может быть вычислена путём объединения моделей представления ясного неба и интенсивности падающих лучей с заданной точностью.

**Ключевые слова:** солнечное излучение, облучённость, прямое излучение, диффузное излучение, отражённое поверхностью земли излучение, угол наклона, электроэнергия.

## 1. Введение

Солнечная энергия является новым, чистым и безопасным источником электроэнергии. Фотоэлектрический модуль непосредственно преобразует энергию света в электроэнергию. В действительности солнечное излучение, существующее над атмосферой Земли, имеет большую интенсивность, чем излучение, достигаемое поверхности Земли [1]. Потери связаны с поглощением атмосферными газами, облаками и другими атмосферными явлениями. Падающее солнечное излучение может генерировать на земле 1 кВт/м<sup>2</sup> при правильном преобразовании [2]. Статистика солнечного излучения и солнечной облучённости необходима инженерам и архитекторам для планирования и проектирования энергоэффективных зданий [3]. Для получения максимальной мощности электрического выхода из солнечной панели очень важна величина

солнечного облучения, падающего на конкретный регион и время пикового солнечного свечения. Солнечное излучение в каждой точке Земли может зависеть от различных параметров, таких как высота над уровнем моря, широта, долгота, географическое положение и влажность [4].

В статье было также рассмотрено влияние нескольких параметров окружающей среды, таких как воздушная масса, мутность по Линке (включая аэрозоли, рэлеевское рассеяние и поглощение различных газов), облачный покров, альbedo, заметные водяные пары, атмосферная мутность (дым, пыль, капли воды) и зависящие от местоположения параметры, такие как зенитный угол, азимутальный угол Солнца, высота над уровнем моря. В качестве эталона была выбрана солнечная панель 250 Вт, которая использовалась для измерения мощности в заданном местоположении. Было проведено исследование влияния ориентации и наклона солнечной панели на вырабатываемую мощность электроэнергии для определения максимальной отдачи солнечного излучения, падающего на неё. Солнечное излучение на наклонной поверхности представляет собой комбинацию прямого (лучевого), рассеянного и отражённого от Земли излучений [5]. С другой стороны, довольно сложно установить люксметры, датчики и пиранометры под каждым углом наклона и ориентацией для сбора всех необходимых данных. Поскольку измерения с использованием этого оборудования очень дороги, то для оценки мощности электроэнергии от солнечной панели была принята методология, основанная на выбранных моделях.

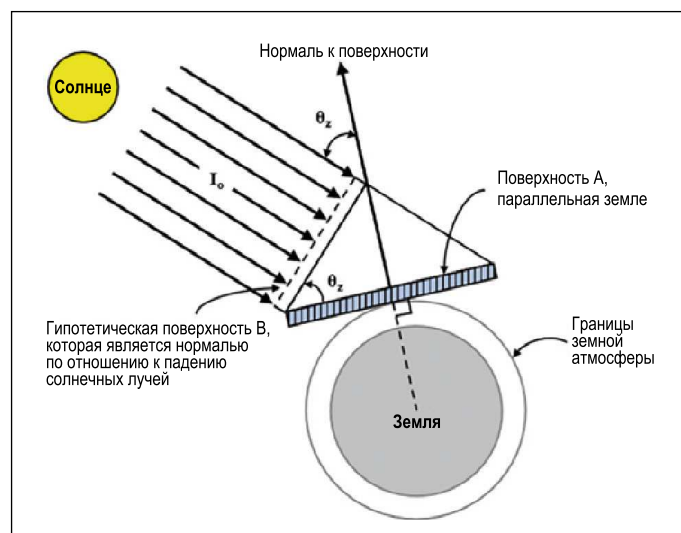


Рис. 1. Расчёт заатмосферной солнечной облучённости горизонтальной поверхности

<sup>1</sup> Перевод с англ. Т.В. Мешкова

Ранее оптимальный угол наклона солнечной панели был рассчитан для некоторых географических областей [6–9]. Новая идея настоящего исследования основана на анализе различных работ по этой теме. Цель этого подхода состоит в том, чтобы объединить модели представления ясного неба и интенсивности падающих лучей для прогнозирования различных компонентов солнечной облучённости на поверхности Земли. Основной целью этой работы является реализация оптимизированных моделей ясного неба и интенсивности падающих лучей с высокой точностью прогнозирования в *MATLAB* для расчёта вырабатываемой электроэнергии для определённого местоположения на почасовой, ежемесячной и годовой основе. Соответствующие результаты представлены в графической форме. Также было проведено сравнение результатов расчёта с фактическими данными, полученными в Национальной лаборатории возобновляемых источников энергии.

## 2. Процесс моделирования

### 2.1. Заатмосферная солнечная облучённость

Заатмосферная солнечная облучённость – это суммарная мощность солнечного излучения на верхней границе атмосферы Земли, проходящего через единичную площадку, ориентированную перпендикулярно потоку (рис. 1). Её можно вычислить с помощью выражения [10]:

$$E_{ext} = E_{SC} \left( 1 + 0,033 \cdot \cos \left( \frac{360 \cdot n}{365} \right) \right), \quad (1)$$

где  $E_{SC} = 1367$  Вт/м<sup>2</sup>,  $n$  – номер дня по юлианскому календарю.

Заатмосферную солнечную облучённость горизонтальной поверхности можно вычислить по формуле ниже:

$$E_{h\_ext} = E_{ext} \cdot \cos \theta_z, \quad (2)$$

где  $\theta_z$  – зенитный угол,  $E_{ext}$  – заатмосферная солнечная облучённость.

### 2.2. Общая горизонтальная облучённость

Общая горизонтальная облучённость (*GHI*, global horizontal irradiance) – это полное количество солнечного излучения на горизонтальной поверхности Земли на уровне моря. Она оказывает решающее влияние на работу ФЭ панелей и состоит из прямой нормальной облучённости (*DNI*, direct normal irradiance) и диффузной горизонтальной облучённости (*DHI*, diffuse horizontal irradiance). Для определения *GHI* обычно используется пиранометр, который имеет полусферический (180°) угол обзора. Для вычислений *GHI* используется модель Кастена:

$$GHI = C_{g1,8} \cdot E_{ext} \cdot \cos \theta_z \times \exp(-C_{g2} \cdot AM \cdot (f_{h1} + f_{h2}(TL - 1)) + 0,01 \cdot AM^{1,8}), \quad (3)$$

где  $TL$  – это мутность Линке, равная 2 в этом случае,

$$C_{g1} = 5,09 \cdot e^{-5h} + 0,868, \quad (4)$$

$$C_{g2} = 3,92 \cdot e^{-5h} + 0,0387, \quad (5)$$

$$f_{h1} = e^{(-h/8000)}, \quad f_{h2} = e^{(-h/1250)},$$

$$\cos \theta_z = \cos \lambda \cdot \cos \delta \cdot \cos w + \sin \lambda \cdot \sin \delta, \quad (6)$$

$$\delta = \arcsin(\sin(23,45^\circ) \cdot \sin(360(d - 81)/365)), \quad (7)$$

$$w = 15 \cdot (SolarTime - 12), \quad (8)$$

$$SolarTime = ClockTime + (L_{std} - L_{oc})/15 + E, \quad (9)$$

$$E = 0,165 \cdot \sin 2B - 0,126 \cdot \cos B - 0,0025 \cdot \sin B, \quad (10)$$

где  $B = 360 \cdot (n - 1)/364$ ,  $n$  – номер дня по юлианскому календарю,  $\lambda$  – широта расположения,  $h$  – высота расположения в футах,  $\delta$  – угол наклона,  $w$  – часовой угол,  $d$  – номер дня в году,  $L_{std}$  – стандартный меридиан местного часового пояса,  $L_{oc}$  – фактическая долгота местоположения.

Оптическая толщина земной атмосферы может быть представлена воздушной массой, которая определяется следующим образом:

$$AirMass \equiv AM = \frac{1}{\cos \theta_z}. \quad (11)$$

Воздушная масса равная 1 означает, что Солнце в зените.

### 2.3. Модель прямой облучённости горизонтальной и наклонной плоскостей

Прямую облучённость горизонтальной  $E_{bh}$  и наклонной плоскости  $I_b$  можно вычислить по [12]:

$$E_{bh} = E_n \cdot \cos \theta_z, \quad (12)$$

$$I_b = E_n \cdot \cos a, \quad (13)$$

где  $E_n$  – облучённость прямыми лучами Солнца плоскости по нормали,  $a$  – угол падения излучения

$$a = \arccos(\sin \theta_{sun} \sin \beta \cdot \cos(\gamma - \gamma_{sun}) + \cos \theta_{sun} \cdot \cos \beta), \quad (14)$$

$$\gamma_{sun} = \arccos\left(\frac{\sin \delta \cdot \cos \lambda - \sin \lambda \cdot \cos \delta \cdot \cos w}{\cos(90 - \theta_z)}\right), \quad (15)$$

где  $\gamma_{sun}$  – азимут Солнца,  $\theta_{sun}$  – зенитный угол Солнца,  $\gamma$  – азимут панели,  $\beta$  – угол наклона панели (см. рис. 2).

### 2.4. Модель нормальной облучённости прямыми лучами Солнца

Нормальная облучённость прямыми лучами Солнца – это общее количество солнечного излучения, приходящееся на единицу площади плоской поверхности, располо-

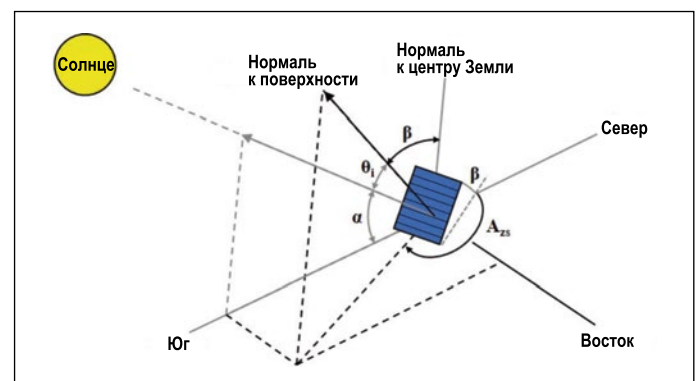


Рис. 2. Углы наклона панели, зенита, азимута и падения

женной перпендикулярно солнечным лучам. Пиргелио-метр обычно используется для измерения  $DNI$ . Он также может быть рассчитан с помощью модели кода моделирования прямой солнечной облучённости ( $DISC$ , *Direct Insolation Simulation Code*) [13] как

$$E_n = K_n \cdot E_{ext}, \quad (16)$$

$$\Delta K_n = K_{nc} - K_n, \quad (17)$$

где  $K_n$  – коэффициент пропускания атмосферой прямых (нерассеянных) лучей Солнца,  $E_{ext}$  – заатмосферная солнечная облучённость,  $K_{nc}$  – коэффициент максимального пропускания модели ясного неба,  $\Delta K_n$  – отличие коэффициента пропускания атмосферы от своего максимального значения.

Для расчёта значения  $K_{nc}$  используется модель *Clear Bird* [14]:

$$K_{nc} = 0,866 - 0,122AM + 0,0121AM^2 + 0,000653AM^3 + 0,000014AM^4. \quad (18)$$

Для вычисления  $\Delta K_n$  используется регрессионный анализ расчёта методом наименьших квадратов

$$\Delta K_n = a + b \cdot e^{c \cdot AM}. \quad (19)$$

Коэффициенты  $a$ ,  $b$  и  $c$  могут быть определены, только если известно значение ясности неба  $K_t$  [15], которое сильно зависит от облачного покрова:

$$K_t = \frac{GHI}{E_{h\_ext}}. \quad (20)$$

Если  $K_t < 0,60$  (облачные условия), то

$$a = 0,512 - 1,56 \cdot K_t + 2,286 \cdot K_t^2 - 2,222 \cdot K_t^3,$$

$$b = 0,370 + 0,962 \cdot K_t,$$

$$c = -0,280 + 0,932 \cdot K_t - 2,046 \cdot K_t^2.$$

Если  $K_t > 0,60$  (в основном ясные условия), то

$$a = -5,743 + 21,77 \cdot K_t - 27,49 \cdot K_t^2 + 11,56 \cdot K_t^3,$$

$$b = 41,40 - 118,5 \cdot K_t + 66,05 \cdot K_t^2 + 31,90 \cdot K_t^3,$$

$$c = -47,01 + 184,2 \cdot K_t - 222,0 \cdot K_t^2 + 73,81 \cdot K_t^3.$$

Как только  $\Delta K_n$  и  $K_{nc}$  известны, то можно легко вычислить  $E_n$  и прямую облучённость излучения, падающего на наклонную плоскость  $I_b = E_n \cdot \cos a$ .

## 2.5. Модель диффузного излучения

Диффузная горизонтальная облучённость ( $DHI$ ) – это диффузное или рассеянное излучение от атмосферы, падающее на горизонтальную плоскость. Значение  $DHI$  обычно измеряется с помощью пиранометра, однако в данном случае прямой солнечный свет заблокирован для устранения прямой составляющей излучения.

Диффузная облучённость наклонной поверхности бывает следующих видов:

- изотропное диффузное излучение;
- околосолнечное излучение;
- свечение горизонта.

Модель Клюхера [16] охватывает все три вышеупомянутых параметра. Таким образом, вычисляемая диффузная облучённость для наклонной плоскости имеет следующий вид:

$$I_{d,sky} = I_d \cdot [(1 - A_l) \cdot ((1 + \cos(\beta)) / 2) \cdot 1 + F \cdot \sin^3(\beta / 2) + A_l \cdot R_b], \quad (21)$$

где  $I_d$  – почасовая составляющая горизонтальной диффузной облучённости, а коэффициенты  $R_b$ ,  $A_l$ ,  $F$  определяются по формулам ниже:

$$R_b = \frac{I_b}{E_{bh}}, \quad A_l = \frac{E_{bh}}{E_{h\_ext}}, \quad F = \frac{E_{bh}}{GHI}.$$

## 2.6. Модель отражённого поверхностью Земли излучения

Согласно предположению Луи и Джордана [17], постоянный коэффициент альбедо можно добавить к значению общей горизонтальной облучённости ( $GHI$ ) для представления отражённой от Земли облучённости на солнечной панели.

$$R_h = 0,2 \cdot G_h. \quad (22)$$

## 2.7. Модель общей интенсивности падающих солнечных лучей на плоскость солнечной панели

Основным этапом при вычислении эффективности солнечной панели является определение общей интенсивности падающих солнечных лучей на плоскость солнечной панели ( $POA$ , *plane of the array*) как функции времени. Такое излучение зависит от нескольких факторов, в том числе направленности падающих лучей: диффузных и отражённых от поверхности Земли. Эти факторы учитываются с помощью алгоритма Переса [18]:

$$I_{poa} = I_{d,sky} + I_{d,ground}, \quad (23)$$

где  $I_{d,sky}$  – вычисленное значение диффузной облучённости наклонной плоскости, а  $I_{d,ground} = 0,2$  по определению.

## 2.8. Модель интенсивности падающих лучей на поверхность солнечного модуля

Учитывая общую интенсивность излучения  $POA$ , падающего на верхнюю поверхность солнечной панели, разработанное программное обеспечение *PV Watts* применяет поправку на угол падения ( $AOI$ , *angle of incidence*) для регулировки интенсивности излучения прямого луча при углах падения более  $50^\circ$  с учётом потерь на отражение. Для коррекции используется многочленная модель коррекции представления ФЭ-матрицы *Sandia* с коэффициентами для стекла.

Модель интенсивности падающих лучей на поверхность модуля может быть представлена в виде:

$$I_{tr} = I_{poa} - (1 - f) \cdot E_n \cdot \cos(a), \quad (25)$$

где  $E_n$  – облучённость прямыми лучами Солнца плоскости по нормали,  $a$  – угол падения излучения,  $I_{poa}$  – интен-

## Обоснование выбора моделей исследования

| Модель              | Цель   | Причина  |
|---------------------|--|--|
| Модель Кастена      | GHI  | Факторы окружающей среды, например воздушная масса ( $AM$ ) и мутность по Линке (в т.ч. аэрозоли, поглощение из-за различных газов и рассеяние Рэлея), а также зависящие от местоположения параметры, например, зенитный угол ( $z$ ), высота над уровнем моря ( $h$ ) |
| DISC                | DNI  | Воздушная масса, облачный покров, альbedo, заметные водяные пары и атмосферная мутность (пыль, дым и капли воды)   |
| Модель Клюхера      | Виды диффузного излучения  | Изотропное диффузное излучение, околосолнечное излучение и свечение горизонта  |
| Алгоритм Переса     | Модель общей интенсивности падающих солнечных лучей на плоскость солнечной панели (поверхности модуля) | Объединяет направленное, рассеянное и отражённое от поверхности Земли излучение  |
| Вычисление мощности | Выходная мощность  | Включает все параметры солнечной панели  |

сивность падающих лучей на плоскость солнечной панели, а коэффициент  $f$  рассчитывается по формуле ниже

$$f = b_0 + b_1 \cdot a + b_2 \cdot a^2 + b_3 \cdot a^3 + b_4 \cdot a^4 + b_5 \cdot a^5, \quad (24)$$

где многочленные коэффициенты  $b_0, b_1, b_2, b_3, b_4$  и  $b_5$  относятся к параметрам модуля ( $b_n$ ) и определяются для стекла.

## 2.9. Модель вычисления мощности

Модуль расчёта электроэнергии был приближён к вычислительному модулю версии *PVFORM*, которая стала прототипом разработанного программного обеспечения *PV watts* [19]. Мощность постоянного тока, протекающего через матрицу солнечной панели, рассчитывается путём сложения номинальной мощности панели, значения интенсивности излучения на плоскости солнечной панели и температуры ячеек.

$$P_{dc} = \frac{I_{tr}}{1000} \cdot P_{dc0} \cdot (1 + \gamma \cdot (T_{cell} - T_{ref})), \text{ если } I_{tr} > 125 \text{ Вт} \cdot \text{м}^{-2} \quad (26)$$

$$P_{dc} = \frac{0,008 \cdot I_{tr}^2}{1000} \cdot P_{dc0} \cdot (1 + \gamma \cdot (T_{cell} - T_{ref})), \text{ если } I_{tr} < 125 \text{ Вт} \cdot \text{м}^{-2}$$

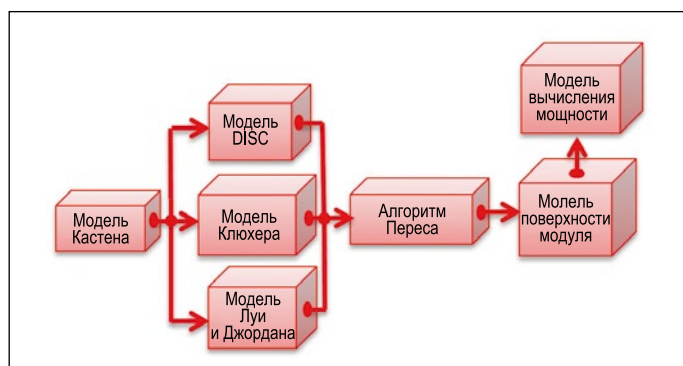


Рис. 3. Блок-схема процесса моделирования

$$I_{tr} < 125 \text{ Вт} \cdot \text{м}^{-2}, \quad (27)$$

где коэффициенты температуры  $\gamma$  зафиксированы на уровне  $-0,5\%$  на  $1^\circ\text{C}$ , принятые для фотоэлектрического модуля на кристаллическом кремнии,  $T_{ref} = 25^\circ$ ,  $T_{cell}$  – температура ячеек в градусах,  $P_{dc0}$  – это номинальная мощность модуля 250 Вт.

## 2.10. Блок-схема процесса моделирования

В параграфе на рис. 3 представлена структурная пошаговая схема расчёта выходной мощности с момента получения пользовательской информации (ввода данных). Каждый блок схемы обладает своим собственным расчётным алгоритмом, описанным выше для каждой из расчётных моделей.

## 3. Инструмент для выбора моделей и фактической реализации

В табл. 1 приводятся обоснование выбора моделей для реализации. Весь процесс происходит в *MATLAB*. Интерфейс разработанного программного обеспечения представлен на рис. 4.

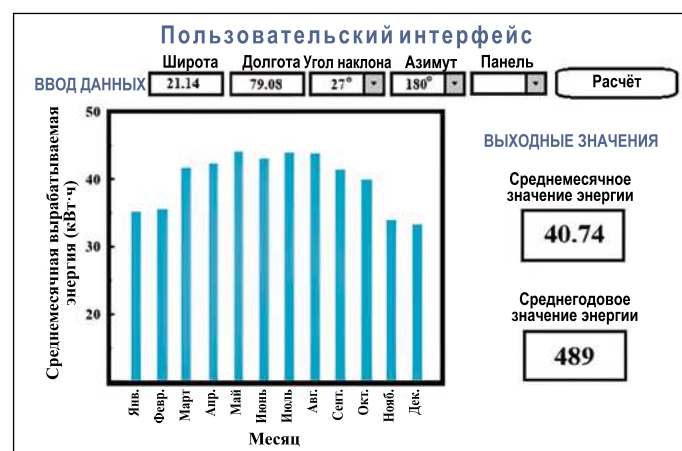


Рис. 4. Интерфейс системы



## Средние расчётные и фактические значения электроэнергии

| Месяц    | Расчётное среднее значение энергии (кВт·ч) | Фактическое среднее значение энергии (кВт·ч) |
|----------|--|--|
| Январь   | 40,4                                       | 41,7   |
| Февраль  | 38,1                                       | 38,5   |
| Март     | 44,0                                       | 43,8   |
| Апрель   | 42,2                                       | 39,6   |
| Май      | 41,3                                       | 38   |
| Июнь     | 38,1                                       | 32,3   |
| Июль     | 40,2                                       | 30,2   |
| Август   | 42   | 30,2   |
| Сентябрь | 42   | 36,5   |
| Октябрь  | 44,1                                       | 41,7   |
| Ноябрь   | 37,4                                       | 39,6   |
| Декабрь  | 37   | 39,6   |

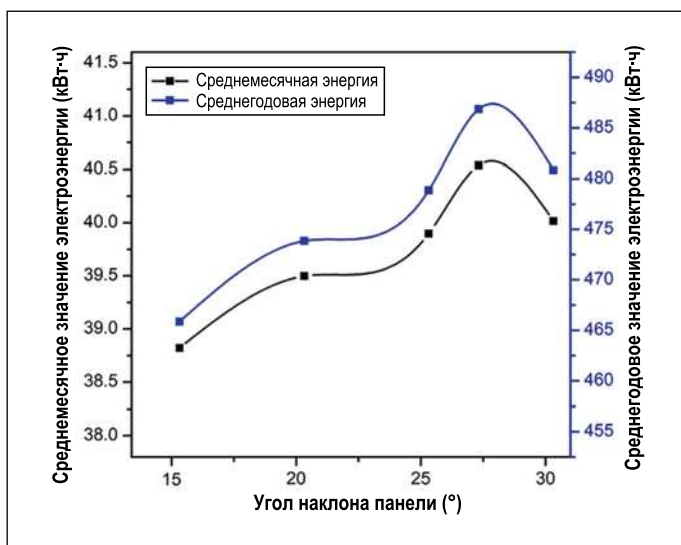


Рис. 5. Среднемесячное и среднегодовое значения энергии для переменного угла наклона панели

#### 4. Обсуждение результатов

В настоящей работе результат получен путём фиксации азимута панели на уровне  $180^\circ$  при переменном угле наклона панели. На рис. 5 среднемесячное и среднегодовое значения электроэнергии суммируются со значением переменного угла наклона панели при фиксированном азимутальном угле панели  $180^\circ$ , обращённой к югу, тем самым формируя её графическое представление.

##### 4.1. Сравнение значений вычисленной и фактической электроэнергии

В этом разделе проводится сравнение результатов расчёта, полученных с использованием рекомендуемого в этой работе программного обеспечения, с фактическими данными (<http://pvwatts.nrel.gov/India/pvwatts.php>). Ниже приводятся технические характеристики (пользовательские данные), которые вводились во время эксперимента:

Местоположение: Нагпур, Индия

Широта:  $21,14^\circ$  N

Долгота:  $79,08^\circ$  E

Угол наклона панели:  $27^\circ$

Азимутальный угол панели:  $180^\circ$



Рис. 6. Расчётное и фактическое среднегодовые значения энергии для панели с оптимальным углом наклона  $27^\circ$

В табл. 2 приводится сравнение расчётных и фактических среднемесячных и среднегодовых значений электроэнергии с оптимальным углом наклона панели, составляющим  $27^\circ$  с фиксированным азимутальным углом обращённой к югу панели  $180^\circ$ . На рис. 6 приводится графическое сравнение расчётных и фактических значений среднегодовой энергии.

Разница между расчётными и фактическими значениями выделяемой электроэнергии немного больше в июле, августе и сентябре. Это обусловлено сезоном муссонов, длящимся с июля по сентябрь.

#### 5. Заключение

Целью данной работы являлось вычисление оптимального угла наклона солнечной панели для получения максимального количества вырабатываемой электроэнергии в месяц и в год для любого местоположения. Выбранные модели представления ясного неба и интенсивности падающих лучей на плоскость солнечной панели включают в себя различные параметры местоположения, окружающей среды и зависимые параметры рассматриваемого модуля (250 Вт). Оценка проводилась путём сравнения значений фактически выделенной электроэнергии и расчётных значений для местоположения Нагпур (Индия) ( $21,14^\circ$  с.ш.,  $79,08^\circ$  в.д.) при наклоне  $27^\circ$ . Было обнаружено, что разница между фактическими и расчётными значениями полученной электроэнергии составляет всего 0,35%. Следовательно, угол  $27^\circ$  является оптимальным углом наклона для обращённой к югу панели для генерации максимального количества электроэнергии. Результаты данной работы позволяют сделать вывод, что для получения данных о солнечном излучении можно использовать модели представления ясного неба и интенсивности падающих лучей, благодаря тому, что они хорошо изучены и

просты в обращении, а также нет необходимости установки дорогостоящих датчиков, например, пиранометров и пиргелиометров.

## Благодарность

Работа выполнена при поддержке Корейского института оценки и планирования энергетических технологий.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ:

1. Schiermeier Q, Tollefson J, Scully T, Witze A, Morton O. Energy alternatives: Electricity without carbon. // Nature News. 2008 Aug 13;454 (7206):816–23.
2. Ulfat I, Javed F, Abbasi FA, Kanwal F, Usman A, Jahangir M, Ahmed F. Estimation of solar energy potential for Islamabad, Pakistan. // InTerragreen 2012: Clean Energy Solutions for Sustainable Environment (CESSE) 2012 (Vol. 18, pp. 1496–1500). Elsevier.
3. Li DH, Lam JC. Measurements of solar radiation and illuminance on vertical surfaces and daylighting implications. // Renewable energy. 2000 Aug 1;20(4):389–404.
4. Xu CY, Singh VP. Dependence of evaporation on meteorological variables at different time-scales and intercomparison of estimation methods. // Hydrological processes. 1998 Mar 15;12(3):429–42.
5. Ineichen P, Guisan O, Perez R. Ground-reflected radiation and albedo. // Solar Energy. 1990 Jan 1;44(4):207–14.
6. Yu C, Khoo YS, Chai J, Han S, Yao J. Optimal orientation and tilt angle for maximizing in-plane solar irradiation for PV applications in Japan. // Sustainability. 2019 Jan;11(7):2016.
7. Khoo YS, Nobre A, Malhotra R, Yang D, Rütther R, Reindl T, Aberle AG. Optimal orientation and tilt angle for maximizing in-plane solar irradiation for PV applications in Singapore. // IEEE Journal of photovoltaics. 2013 Dec 12;4(2):647–53.
8. Benganem M. Optimization of tilt angle for solar panel: Case study for Madinah, Saudi Arabia. // Applied Energy. 2011 Apr 1;88 (4):1427–33.
9. Skeiker K. Optimum tilt angle and orientation for solar collectors in Syria. // Energy Conversion and Management. 2009 Sep 1;50 (9):2439–48.
10. Noia M, Ratto CF, Festa R. Solar irradiance estimation from geostationary satellite data: I. Statistical models. // Solar Energy. 1993 Dec 1;51 (6):449–56.
11. Ineichen P, Perez R. A new airmass independent formulation for the Linke turbidity coefficient. // Solar Energy. 2002 Sep 1;73(3):151–7.
12. Duffie JA, and Beckman WA, 2006. Solar engineering of thermal processes, America.
13. Marion B. A model for deriving the direct normal and diffuse horizontal irradiance from the global tilted irradiance. // Solar Energy. 2015 Dec 1; 122:1037–46.
14. Reno MJ, Hansen CW, Stein JS. Global horizontal irradiance clear sky models: Implementation and analysis. // SANDIA report SAND2012–2389. 2012 Mar.
15. Mellit A, Kalogirou SA, Shaari S, Salhi H, Arab AH. Methodology for predicting sequences of mean monthly clearness index and daily solar radiation data in remote areas: Application for sizing a stand-alone PV system. // Renewable Energy. 2008 Jul 1;33(7):1570–90.
16. Klucher TM. Evaluation of models to predict insolation on tilted surfaces. // Solar energy. 1979 Jan 1;23(2):111–4.

17. Liu BY, Jordan RC. The long-term average performance of flat-plate solar-energy collectors: with design data for the US, its outlying possessions and Canada. // Solar energy. 1963 Apr 1;7(2):53–74.

18. Perez R, Ineichen P, Seals R, Michalsky J, Stewart R. Modeling daylight availability and irradiance components from direct and global irradiance. // Solar energy. 1990;44(5):271–89.

19. Menicucci DF, Fernandez JP. Users manual for PVFORM: A photovoltaic system simulation program for stand-alone and grid-interactive applications. // Sandia National Labs., Albuquerque, NM (United States); 1989 Oct 1.



**Мухаммад Алим Захид (Muhammad Aleem Zahid), М. Sc.** Родился в Равалпинди, Пакистан, в 1990 году. Он получил степень бакалавра и магистра в области электротехники в Инженерно-Технологический Университете Таксилы, Пакистан, в 2012 и 2016 годах. Он занимается кандидатской диссертацией по электротехнике в Университете Сунгкюнкван (SKKU), Суwon, Южная Корея. Область интересов – фотоэлектрические модули и технологии солнечных батарей



**Ганеш Т. Чаван (Ganesh T. Chavan), М. Sc., Ph.D.** Получил степень магистра в 2014 году и степень кандидата наук в Университете Солапура (Солапур, Индия) в 2017 году по специальности в области материаловедения. Он является соискателем на степень Ph.D. в Университете Сунгкюнкван (SKKU), Суwon, Южная Корея. В настоящее время его научные интересы включают кремниевые гетеропереходные солнечные элементы, двусторонние солнечные

элементы, различные типы светопрозрачных проводящих оксидов для солнечных элементов, генерацию солнечной энергии в водород и применение суперконденсаторов



**Янг Хюн Чо (Young Hyun Cho), Ph.D.** Получил степень бакалавра и магистра по электротехнике в Университете Ханьян и Университете Нового Южного Уэльса в 1987 и 1994 годах соответственно, а также степень доктора философии по фотоэлектрической инженерии в Университете Нового Южного Уэльса в 2009 году. Он является профессором-исследователем Университета Сунгкюнкван (SKKU), Суwon, Южная Корея. Он является вице-президентом

Комитета Корейского Фотоэлектрического Общества



**Джунсин Ы (Junsin Yi), Ph.D.** Родился в Сеуле, Корея, в 1962 году. В 1989 году он получил степень бакалавра в области электроники и электротехники в Корейском Университете Сунгкюнкван. Он получил степень магистра и доктора наук в области электроники и электротехники в Государственном Университете Нью-Йорка, Университете Буффало, США в 1991 и 1994 годах соответственно, в настоящее время он работает профессором в Университете

Сунгкюнкван (SKKU), Суwon, Южная Корея. Его основной научный интерес – солнечные элементы и тонкопленочный транзистор

# Физико-математическая модель зависимости внутренней квантовой эффективности светодиодов с квантовыми ямами от тока

Ф.И. МАНЯХИН\*, Л.О. МОКРЕЦОВА

НИТУ «МИСиС», Москва

\* E-mail: zaomisis@yandex.ru

## Аннотация

С использованием модели темпа рекомбинации  $ABC$  в квантовых ямах разработана физико-математическая модель зависимости внутренней квантовой эффективности от тока для светодиодных структур с квантовыми ямами. С привлечением теории рекомбинации Шокли-Нойса-Саа, дополненной функцией распределения квантовых ям, смоделирована вольт-амперная характеристика этих структур. Проведено тестирование разработанной модели при вариациях параметров квантовых ям и условий внешних воздействий.

**Ключевые слова:** светодиодные структуры с квантовыми ямами, внутренняя квантовая эффективность, модель рекомбинации Шокли-Нойса-Саа, модель рекомбинации  $ABC$ .

## Введение

Светодиоды (СД) с квантовыми ямами (КЯ) являются перспективными источниками света для осветительных приборов, полноцветных экранов, оптронов и др.

Одним из основных параметров СД с КЯ является квантовая эффективность (КЭ). С начала серийного выпуска СД на основе гетероструктур с КЯ  $AlGaIn/InGaIn/GaN$  и  $AllnGaP$  [1, 2] начались интенсивные исследования зависимости КЭ от плотности прямого тока  $J$ .

В одной из первых работ по анализу поведения КПД СД синего и зелёного света фирмы *Lumileds Lighting* [3] показано, что он имеет максимум при  $J = 1-10 \text{ А} \cdot \text{см}^{-2}$ . Отмечено, что большие значения максимума КПД соответствуют большему легированию барьеров и ярко выраженным периодическим изменениям концентрации примеси в области КЯ (модулированно-легированная область КЯ).

По данным [4], при сильном световом возбуждении, когда скорость генерации носителей заряда (НЗ) равнялась  $1,7 \cdot 10^{26} \text{ см}^{-3} \cdot \text{с}^{-1}$ , с уменьшением плотности дислокаций от  $5,7 \cdot 10^9$  до  $5,3 \cdot 10^8 \text{ см}^{-2}$  внешняя КЭ ( $\eta_E$ ) возрастала с 31 до 64 %. При этом максимум  $\eta_E$  при снижении качества эпитаксиальных слоёв снижается и смещается в сторону больших значений  $J$ .

Измерения  $\eta_E$  при разных температурах [4, 5] показали, что с ростом температуры СД структур с КЯ максимум КЭ снижается и смещается в область больших  $J$ .

При анализе рекомбинационных процессов в КЯ широко используется модель  $ABC$  [6–10], позволяющая описывать темп рекомбинации в СД структурах при разных уровнях инжекции с учётом излучательного и безызлучательного механизмов:

$$R(n) = \frac{n}{\tau} = An + Bn^2 + Cn^3 + f(n), \quad (1)$$

где  $R$  – темп рекомбинации;  $n$  – избыточная концентрация НЗ, участвующих в рекомбинационном процессе;  $\tau$  – усреднённое время жизни НЗ;  $A, B, C$  – экспериментально определяемые коэффициенты для темпов рекомбинации по механизмам Шокли-Рида-Холла ( $A$ ), излучательному ( $B$ ) и Оже ( $C$ ). Остальные механизмы образования тока учитываются дополнительным слагаемым  $f(n)$ .

Более тонкие механизмы, влияющие на КЭ СД с КЯ, проанализированы в работах [11, 12] и др., но всё же все выявленные в них отличия укладываются в модель  $ABC$ .

Проведённый анализ литературных источников позволил выявить, что: 1) кривая зависимости от тока  $\eta_E$  СД структур с КЯ имеет колоколообразный вид с максимумом при  $J = 1 \cdot 10^{-2} - 1 \cdot 10 \text{ А} \cdot \text{см}^{-2}$ ; 2) высота максимума и его положение по току зависят от совершенства гетероструктуры и её температуры; 3) до настоящего времени отсутствуют математические модели зависимости  $\eta_E$  и внутренней КЭ ( $\eta_I$ ) от тока, а в качестве модели вольт-амперной характеристики (ВАХ) используется модель Шокли-Нойса-Саа (ШНС) [13] (развитая в работе [14]), не учитывающая неоднородность темпа рекомбинации в области пространственного заряда (ОПЗ) с КЯ.

На основании анализа выявлена общая проблема – отсутствие аналитической модели, определяющей взаимосвязь ВАХ и люмен-вольтовых характеристик (ЛВХ) для СД гетероструктур на основе широкозонных полупроводников с КЯ и позволяющей удовлетворительно описывать и моделировать поведение  $\eta_E$  и  $\eta_I$  при разных внешних воздействиях и особенностях технологической структуры СД.

Цель настоящей работы – разработать аналитическую модель зависимости  $\eta_I$  ( $\eta_E$ ) от тока на основе физических представлений о рекомбинационных процессах в гетероструктурах с КЯ.

Задачи работы: провести экспериментальные исследования поведения ВАХ и  $\eta_E$  СД с КЯ при разных температурах и при введении в них точечных и протяжённых дефектов (дислокаций, областей разупорядоченности); создать физико-математическую модель зависимости  $\eta_E$  ( $\eta_I$ ) от тока; провести проверку работоспособности этой модели при разных внешних воздействиях и вариациях технологических параметров СД гетероструктур.

Для исключения двусмысленности и усложнения модели далее в работе принимается, что между  $\eta_E$  и  $\eta_I$  существует пропорциональная связь через постоянный коэффициент:  $\eta_E = \alpha \cdot \eta_I$ ,  $\alpha < 1$ . Поэтому при моделировании КЭ в зависимости от тока речь будет идти о  $\eta_I$ , а  $\eta_E$  может определяться по ней с учётом коэффициента  $\alpha$ .

При разработке модели предполагается, что распределение НЗ в квазинейтральных областях и ОПЗ соответствует распределению Больцмана.

## Эксперимент

Исследовались СД на основе гетероструктур  $AlGaIn/InGaIn/GaN$  и  $AllnGaP$  с КЯ синего, зелёного, жёлтого и красного света фирм *Lumileds*, *Epistar* и произведённых в КНР. Измерялись ВАХ, ЛВХ и распределение легирующей примеси в области расположения КЯ при температурах 300 и 373 К. Графическое представление этих характеристик приведено в статье [15].

Экспериментальные образцы фирмы *Lumileds* синего света маркировались буквой *B*, зелёного света – буквой *G* (со структурой  $InGaIn/GaN$ ) и красного света – буквой *R* (со структурой  $AllnGaP$ ).

ВАХ измерялись на компьютеризированной установке. Диапазон измерения токов:  $1 \cdot 10^{-7}$ – $1 \cdot 10^{-1}$  А ( $J = 1 \cdot 10^{-4}$ – $1 \cdot 10^2$  А·см<sup>-2</sup>), до максимального напряжения 5,12 В. Шаг по напряжению прямого смещения был  $\Delta U = (0,02 \pm 1 \cdot 10^{-4})$  В.

Распределение примеси в области расположения КЯ измерялось методом динамической ёмкости на оригинальной компьютеризированной установке [16]. Разрешение по глубине профиля концентрации примеси было до 1 нм.

Излучение фиксировалось кремниевым фотодиодом ФД 7К, включённым в режим преобразования света в фототок.

Для выяснения влияния точечных и протяжённых микродефектов на  $\eta_I$  все СД подвергались воздействию флюенсами реакторных нейтронов ( $\Phi$ ) в  $10^6$ ,  $10^7$ ,  $10^8$  и  $10^{15}$  см<sup>-2</sup> на установке ИРТ 2000. При этом измерялись энергетический спектр и плотность потока нейтронов (она составляла  $5 \cdot 10^{10}$  см<sup>-2</sup>·с<sup>-1</sup>).

Обработка экспериментальных данных и моделирование характеристик СД проводились с использованием пакетов программ «*Origin 8*» и «*MathCad 14*».

Экспериментальные зависимости  $\eta_E$  от тока  $I$  представлены на рисунке (графики 1а и 2а). При повышении температуры от 300 до 373 К максимум  $\eta_E$  снижается на 8–12 % и сдвигается в область больших токов более, чем на порядок (на рисунке не показано).

Более сильное снижение  $\eta_E$  наблюдалось у СД после облучения нейтронами при  $\Phi = 1 \cdot 10^{15}$  см<sup>-2</sup>. Максимум  $\eta_E$  снижается по-разному у структур  $AlGaIn/InGaIn/GaN$  и  $AllnGaP$  и сдвигается в сторону больших токов. При  $\Phi$  до  $1 \cdot 10^8$  см<sup>-2</sup> сколько-нибудь существенных изменений зависимости  $\eta_E(I)$  при комнатной температуре не наблюдалось.

Исследование влияния нейтронного облучения на прозрачность линз не проводилось, но визуально заметного изменения прозрачности линз не возникало.

Изменения в распределении заряженных центров примеси в области КЯ после облучения нейтронами при  $\Phi$  до  $10^{15}$  см<sup>-2</sup> для СД с разной энергией квантов происходило по-разному. Так, у СД синего и зелёного света наблюдалась компенсация примеси только в небольшой области у границы края ОПЗ слабо легированного слоя. Существенное снижение концентрации активной примеси в пределах изменения ОПЗ происходило у СД жёлтого и красного света.

Фактор неидеальности экспоненциального участка ВАХ увеличивался после нейтронного облучения на 20–30 %, а ток насыщения – на 5–6 порядков.

## Обсуждение

В качестве модельного объекта примем несимметричную  $p$ – $n^+$ -СД структуру с равномерно легированными слоями  $p$ - и  $n^+$ -типов. КЯ расположены в относительно слабо легированном  $p$ -слое в пределах ОПЗ при отсутствии напряжения смещения. Координаты КЯ отсчитываются от металлургической границы.

Предполагается отсутствие туннелирования, токов утечки и других механизмов образования тока кроме рекомбинационных Шокли-Рида-Холла (ШРХ), излучательного и Оже; основными механизмами образования тока СД структур являются диффузионный механизм Шокли [17] и механизм ШНС [13]. При этом КЯ представляются единичными центрами рекомбинации с сечением захвата  $\sigma$ .

НЗ, попавшие в КЯ, образуют ток, который делится на две составляющие: излучательную по механизму зона-зона и безызлучательную по механизмам рекомбинации через локальные центры и механизму Оже. Кроме того, при наличии в запрещённой зоне барьеров локальных уровней точечных дефектов возможно образование рекомбинационного тока по механизму ШНС по всей ОПЗ. Таким образом, плотность общего рекомбинационного тока при прямом смещении в такой структуре  $J$  есть некая сумма:

$$J = J_{QW} + J_{rec} + J_{dif},$$

где  $J_{QW}$  – плотность рекомбинационного тока через квантовые ямы,  $J_{rec}$  – плотность рекомбинационного тока через локальные уровни точечных дефектов в ОПЗ,  $J_{dif}$  – плотность диффузионного тока НЗ, преодолевших потенциальный барьер  $p$ – $n^+$ -перехода и попавших в КЯ в квазинейтральной части  $p$ -области. В диапазоне рабочих токов СД  $J_{rec}, J_{QW} \gg J_{dif}$ .

Таким образом,  $\eta_E$ , пропорциональная  $\eta_I$ , определяется отношением токов излучательной и безызлучательной рекомбинаций. Экспериментальные результаты (рисунков) указывают на то, что коэффициенты модели  $ABC$  для разных типов СД сильно различны, на что указывают разные положения максимумов  $\eta_I(\eta_E)$  [7]. Как показало моделирование, это во многом касается коэффициентов  $A$  и  $C$ .

Для создания модели зависимости  $\eta_I$  от прямого тока была привлечена теория ВАХ ШНС, в которой было принято, что уровни рекомбинационных центров расположены вблизи середины запрещённой зоны и сечения захвата электронов и дырок одинаковые. Но в отличие от её классического описания, где предполагается равномерность распределения рекомбинационных центров в ОПЗ симметричной  $p$ – $n$ -структуры, в настоящей работе принято во внимание, что КЯ распределены в несимметричной структуре дискретно, т.е. являются рекомбинационными центрами, распределёнными в соответствии с некой функцией  $f_{QW}(x, U)$ . В общем случае и энергетические уровни точечных дефектов распределены неравномерно [18], в соответствии с функцией  $f_i(x, U)$ .

После принятых условий величину  $J_{QW}$  можно выразить как

$$\begin{aligned}
J_{QW} &= q\sigma N_{QWmd}(U)W(U)V_T N_d \cdot F_{QW}(U) = \\
&= q\sigma N_{QWmd}(U)W(U)V_T N_d \cdot \exp\left(-\frac{\varphi_k}{n^*(U)kT}\right) \times \\
&\quad \times \left[ \exp\left(\frac{qU}{n^*(U)kT}\right) - 1 \right] = \\
&= J_{SQW}(U) \left[ \exp\left(\frac{qU}{n^*(U)kT}\right) - 1 \right], \quad (2)
\end{aligned}$$

где, с привлечением модели ШНС,  $F_{QW}(U)$  выражается формулой (3) и где, в (2) и (3),  $f_{QW}(x, U)$  – функция распределения КЯ в относительно слабо легированном слое;  $N_{QWmd}(U)$  – средняя по ОПЗ концентрация КЯ, зависящая от напряжения смещения  $U$  вследствие изменения ширины ОПЗ и числа находящихся в ней КЯ;  $\varphi_k$  – высота потенциального барьера;  $N_{QWmd}(U) = \frac{1}{W(U)} \int_{-x_n}^{x_p} N_{QW}(x, U) dx$ ;  $N_{QW}(x, U)$  – распределение КЯ в ОПЗ;

$$f_{QW}(x, U) = \frac{N_{QW}(x, U)}{N_{QWmd}(U)}; \quad x_n = -\frac{W(U) \cdot N_a}{N_d + N_a}; \quad x_p = \frac{W(U) \cdot N_d}{N_d + N_a};$$

$$W(U) = \sqrt{\frac{2\varepsilon\varepsilon_0(N_a + N_d) \cdot (\varphi_k - qU)}{qN_a N_d}} \text{ – ширина ОПЗ; } b = N_d /$$

$N_a$ ;  $g = 2n_i/N_a$ ;  $N_a$  и  $N_d$  – концентрации акцепторных и донорных примесей.

В формуле (3) принято, что фронт потенциального барьера со стороны  $n^+$ -области растёт линейно, поэтому в формуле он обозначен как  $\frac{(\varphi_k - qU)}{W(U)}(x - x_n)$ ; это допущение практически не влияет на суть модели.

Коэффициент  $n^*(U)$  определяется по формуле

$$n^*(U) = -\frac{(\varphi_k - qU)}{kT} \left[ \ln(F_{QW}(U)) \right]^{-1}.$$

$$\begin{aligned}
F_{QW}(U) &= \\
&= \int_{-x_n}^{x_p} \frac{1}{W(U)} \cdot \frac{f_{QW}(x, U) \cdot \exp\left(-\frac{\varphi_k}{kT}\right) \left( \exp\left(\frac{qU}{kT}\right) - 1 \right)}{b \cdot \exp\left(-\frac{(\varphi_k - qU)}{W(U) \cdot kT}(x - x_n)\right) + \exp\left(-\frac{(\varphi_k - qU) - \frac{(\varphi_k - qU)}{W(U)}(x - x_n)}{kT}\right) + g} dx = \\
&= \exp\left(\frac{-\varphi_k}{n^*(U)kT}\right) \cdot \exp\left[\frac{qU}{n^*(U)kT} - 1\right]. \quad (3)
\end{aligned}$$

Учитывая дискретный характер распределения КЯ, функцию  $f_{QW}(x, U)$  запишем в виде

$$\begin{aligned}
f_{QW}(x, U) &= \frac{N_{QW}(x, U)}{N_{QWmd}(U)} = \\
&= \frac{\sum_i \begin{pmatrix} 0 \mapsto x < a_i \\ (\frac{1}{H} + \beta \cdot N_{rec}) \mapsto a_i \leq x \leq (a_i + H) \\ 0 \mapsto x > (a_i + H) \end{pmatrix}}{N_{QWmd}(U)},
\end{aligned}$$

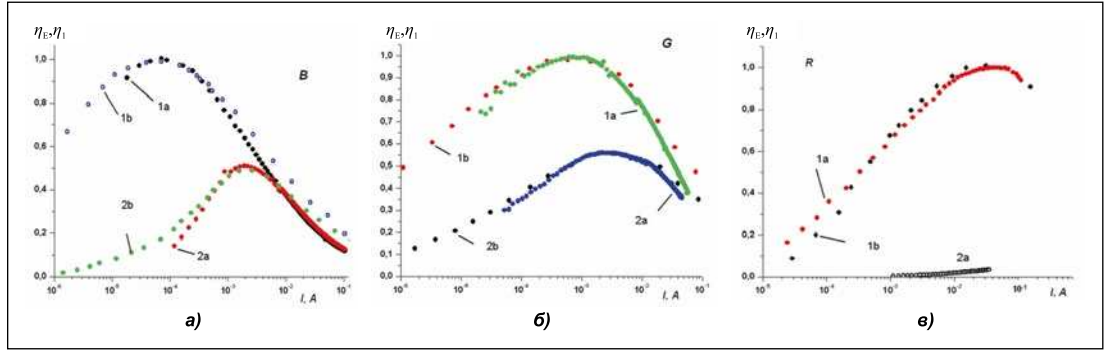
где  $a_i$  – положение края  $i$ -й КЯ относительно металлургической границы,  $H$  – ширина КЯ,  $N_{rec}$  – концентрация безызлучательных центров в КЯ,  $\beta = \sigma_{rec}/\sigma$  – отношение сечения захвата безызлучательных рекомбинационных центров к сечению захвата КЯ,  $1/H$  – коэффициент из условия  $\frac{1}{H} \cdot \int_a^{a+H} dx = 1$  (для единичного рекомбинационного центра).

Ток безызлучательной рекомбинации в ОПЗ в зависимости от  $U$  по механизму ШНС описывается выражениями, тождественными (2) и (3). При этом плотность тока  $J_t$  выражается как

$$\begin{aligned}
J_t &= q\sigma_t N_{tmd}(U)W(U)V_T N_d F_t(U) = \\
&= q\sigma_t N_{tmd}(U)W(U)V_T N_d \cdot \exp\left(-\frac{(\varphi_k)}{n_t^*(U)kT}\right) \times \\
&\quad \times \left[ \exp\left(\frac{qU}{n_t^*(U)kT}\right) - 1 \right] = J_{st} \left[ \exp\left(\frac{qU}{n_t^*kT}\right) - 1 \right],
\end{aligned}$$

где  $F_t(U)$  – функция, тождественная функции по формуле (3), в которой вместо распределения КЯ введена функция распределения,  $f_t(x, U)$ , суммы концентраций изначальных,  $N_{to}(x, U)$ , и генерированных (наработкой, радиацией),  $N_{tr}(U)$ , точечных дефектов, а также сечения захвата НЗ рекомбинационными центрами дефектов  $\sigma_t$  и  $\sigma_r$  соответственно:  $\sigma_r/\sigma_t = \gamma$ . Вследствие этого  $f_t(x, U) = [N_{to}(x, U) + \gamma \cdot N_{tr}(U)]/N_{tmd}(U)$ , где  $N_{tmd}(U)$  – средняя концентрация точечных дефектов в ОПЗ.

Рисунок. Зависимости  $\eta_E$  (эксперимент, графики 1a, 2a) и  $\eta_I$  (модель, графики 1b, 2b) от тока  $I$  для светодиодов синего (а), зелёного (б) и красного (в) света. Графики 1a и 1b – для исходных структур и нормированы к единице, график 2a – для облучённых нейтронами структур, график 2b – для модельных структур с введённой в модели концентрацией радиационных дефектов



Коэффициент показателя экспоненты  $n_t^*(U)$  для  $F_t(U)$  выражается как

$$n_t^*(U) = -\frac{(\varphi_k - qU)}{kT} \left[ \ln(F_t(U)) \right]^{-1}.$$

Будем считать, что излучательная рекомбинация происходит только в КЯ и лимитируется долей безызлучательного потока. Поэтому допустимо применять модель ABC для определения  $\eta_I$ , причём для каждой  $i$ -й КЯ, так как концентрация избыточных НЗ в КЯ при одном и том же  $U$  разная:

$$n_{iQW} = \exp\left(\frac{\Delta E}{n_i^*(U) \cdot kT}\right) \cdot N_d \cdot \int_{-x_n}^{x_p} F_{iQW}(x, U) dx, \quad (4)$$

где  $F_{iQW}(x, U)$  – функция для одиночной КЯ вида (3),  $\Delta E$  – разность энергий запрещённых зон материалов барьеров и КЯ.

$$f_{iQW}(x, U) = \frac{\begin{cases} 0 \mapsto x < a_i \\ \left(\frac{1}{H} + \beta \cdot N_{rec}\right) \mapsto a_i \geq x \geq (a_i + H) \\ 0 \mapsto x > (a_i + H) \end{cases}}{N_{iQWmd}(U)},$$

а

$$N_{iQWmd}(U) = \int_{-x_n}^{x_p} \begin{cases} 0 \mapsto x < a_i \\ \left(\frac{1}{H} + \beta \cdot N_{rec}\right) \mapsto a_i \geq x \geq (a_i + H) \\ 0 \mapsto x > (a_i + H) \end{cases} dx.$$

Темпы рекомбинации в  $i$ -й КЯ по трёхмерной модели ABC выражаются формулами

$$R_{Si}(U) = A \cdot n_{iQW}, \quad R_{Ri}(U) = B \cdot n_{iQW}^2, \quad R_{Ai}(U) = C \cdot n_{iQW}^3,$$

где  $R_{Si}(U)$ ,  $R_{Ri}(U)$  и  $R_{Ai}(U)$  – темпы рекомбинации по механизмам ШРХ, зона-зона и Оже в одной  $i$ -й КЯ соответственно;  $A$ ,  $B$  и  $C$  – коэффициенты модели ABC. При этом должен соблюдаться принцип равенства рекомбинационных потоков по ШНС и модели ABC.

Области КЯ, по сути, двумерны. Поэтому рассчитываемая по (4) концентрация избыточных НЗ, имеющая размерность  $\text{см}^{-3}$ , для КЯ должна быть принята равной дву-

мерной концентрации НЗ, т.е. (4) необходимо умножить на ширину КЯ  $H$ , а коэффициенты  $A$ ,  $B$  и  $C$  должны быть приведены к двумерной модели ABC [19]. Тогда  $\eta_I$  в зависимости от концентрации избыточных носителей заряда в КЯ можно выразить формулой

$$\eta_I = \frac{B \cdot \sum_i (H n_{iQW})^2}{\left( \left[ A \cdot \sum_i (H n_{iQW}) + J_t / q \right] + \left[ B \cdot \sum_i (H n_{iQW})^2 + C \cdot \sum_i (H n_{iQW})^3 \right] \right)}, \quad (5)$$

где коэффициенты  $A$ ,  $B$ ,  $C$  соответствуют двумерной модели.

Зависимость  $\eta_I$  от тока определяется зависимостью избыточной концентрации от тока, а зависимость от  $J$  внешнего квантового выхода  $L$  описывается как

$$L(J) = \alpha \cdot \frac{J}{q} \cdot \eta_I.$$

В (5) темп безызлучательной рекомбинации в барьерах между КЯ выражается отношением  $J_t / q = A_t \cdot n_t$ , где  $A_t$  – коэффициент модели ABC для механизма рекомбинации ШРХ в областях между КЯ, а  $n_t$  – эффективная концентрация НЗ на энергетическом уровне  $(\varphi_k - qU)/(n_t^*k)$  (эффективный уровень протекания НЗ к области рекомбинации).

## Заключение

Представленная модель была протестирована по воздействию температур от  $-200$  до  $500$  К и  $\Phi$  от  $10^6$  до  $10^{15} \text{ см}^{-2}$ , по степени легирования области расположения КЯ от  $1 \cdot 10^{17}$  до  $7 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$ , а также по координатам КЯ и их ширине. Модельные зависимости  $\eta_I$  без учёта четвертого слагаемого  $f(n)$  в выражении (1) представлены на рисунке (графики 1b и 2b). Параметры моделей приведены в табл. 1. Параметры полупроводников для моделей заимствованы из [20].

Вариации параметров модели показали, что на зависимость  $\eta_I$  от тока в большей мере влияют расположение КЯ относительно металлургической границы, степень легирования  $p$ - и  $n$ -областей, начальная ширина ОПЗ и глубина КЯ. В меньшей степени на положение максимума  $\eta_I$  и его значения оказывает влияние ширина КЯ.

Для получения удовлетворительного согласия результатов моделирования  $\eta_I$  подбирались коэффициенты двумерной модели ABC [19] и учитывались особенности взаимо-

Параметры моделей светодиодов

| Образец СД | Концентрация доноров $N_d, \text{см}^{-3}$ | Концентрация акцепторов $N_a, \text{см}^{-3}$ | Ширина КЯ, нм | Ширина барьеров, нм | Положение первой КЯ $a_1$ , нм |
|------------|--|---|---------------|---------------------|--------------------------------|
| B (5 КЯ)   | $2 \cdot 10^{19}$                          | $7 \cdot 10^{18}$                             | 3,0           | 12                  | 5,2                            |
| G (5 КЯ)   | $2 \cdot 10^{19}$                          | $8 \cdot 10^{17}$                             | 3,0           | 12                  | 4,5                            |
| R (8 КЯ)   | $2 \cdot 10^{18}$                          | $8 \cdot 10^{17}$                             | 2,5           | 7,5                 | 2,0                            |

Таблица 2

Модельные коэффициенты  $A$ ,  $B$ ,  $C$  и параметры зависимостей  $\eta_I$  для исходных образцов светодиодов

| Образец СД | $A, \text{с}^{-1}$ | $B, \text{см}^2 \cdot \text{с}^{-1}$ | $C, \text{см}^4 \cdot \text{с}^{-1}$ | $n_{\text{max}}, \text{см}^{-2}$<br>при 300 К<br>(модель) | $I_{\text{max}}, \text{А}$ |                     | $\eta_{I\text{max}}$ |                     |
|------------|--------------------|--------------------------------------|--------------------------------------|---|----------------------------|---------------------|----------------------|---------------------|
|            |                    |                                      |                                      |   | $T = 300 \text{ К}$        | $T = 373 \text{ К}$ | $T = 300 \text{ К}$  | $T = 373 \text{ К}$ |
| B (5 КЯ)   | $1 \cdot 10^4$     | $8 \cdot 10^{-6}$                    | $1 \cdot 10^{-15}$                   | $1,5 \cdot 10^8$  | $7,1 \cdot 10^{-5}$        | $1,3 \cdot 10^{-3}$ | 1,0                  | 0,93                |
| G (5 КЯ)   | $3 \cdot 10^4$     | $8 \cdot 10^{-6}$                    | $4 \cdot 10^{-19}$                   | $9 \cdot 10^{12}$   | $7,2 \cdot 10^{-4}$        | $1,0 \cdot 10^{-2}$ | 1,0                  | 0,94                |
| R (8 КЯ)   | $8 \cdot 10^6$     | $4 \cdot 10^{-5}$                    | $8 \cdot 10^{-20}$                   | $1 \cdot 10^{13}$   | $4,6 \cdot 10^{-2}$        | $2,5 \cdot 10^{-1}$ | 1,0                  | 0,90                |

действия нейтронов с полупроводниками: сечение взаимодействия нейтронов с атомами, образование треков и пр. Концентрацию точечных дефектов, создаваемых нейтронами, рассчитывали по формуле [21, с. 27]

$$N_{\text{тр}} = \Phi N_i \sigma_d \bar{v},$$

где  $\Phi$  – интегральный поток нейтронов,  $N_i$  – число атомов в единице объёма полупроводника,  $\sigma_d$  – поперечное сечение столкновений,  $\bar{v}$  – среднее число смещённых атомов, приходящихся на один первично смещённый атом.

$\bar{v}$  составляет приблизительно  $3 \cdot 10^2$  на один налетающий нейтрон. Так как соударение нейтрона происходит с ядром атома, то  $\sigma_d$  принято равным порядка  $1 \cdot 10^{-24} \text{ см}^2$ . Область разупорядоченности после столкновения нейтрона с первичным атомом составляет 50–60 нм [21].

Модельные коэффициенты  $A$ ,  $B$  и  $C$  для двумерной модели  $ABC$  приведены в табл. 2. Для СД красного ( $R$ ) света моделирование в случае облучения нейтронами при  $\Phi = 1 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-2}$  не проводили из-за сильного спада  $\eta_I$ , который, по-видимому, связан с возникновением туннельного тока из-за образования больших разупорядоченных областей, сравнимых с периодом следования КЯ.

В табл. 2  $n_{\text{max}}$  и  $I_{\text{max}}$  – значения избыточной концентрации НЗ и тока при максимальном значении  $\eta_I$  ( $\eta_{I\text{max}}$ ), приведённом к единице.

На темп безызлучательной рекомбинации по ШРХ и, соответственно, на коэффициенты  $A$  и  $A_1$  во многом влияет степень совершенства кристаллической структуры КЯ [4].

## Выводы

1. Разработана физико-математическая модель зависимости внутренней квантовой эффективности СД с КЯ от тока с использованием моделей рекомбинации ШНС и  $ABC$ ; в модель ШНС введена функция распределения КЯ, а модель  $ABC$  применена для выделения темпов излучательной и безызлучательной рекомбинаций в КЯ.

2. Вследствие малой ширины КЯ для расчёта в них темпа рекомбинации по модели  $ABC$  необходимо использовать численное значение концентрации НЗ как двумерную концентрацию избыточных носителей заряда и соответствующие коэффициенты  $A$ ,  $B$  и  $C$ , приведённые к двумерной модели.

Работа выполнена при государственной поддержке, предоставленной в рамках реализации Программы повышения конкурентоспособности НИТУ «МИСиС» среди ведущих мировых научно-образовательных центров на 2013–2020 гг.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Nakamura S., Iwasa M.S. Method of manufacturing p-type compound semiconductors // Patent N5306662. Apr. 1994. Japan.
2. Amano H., Akasaki I. et al. Method for producing a luminous element of III-group nitride. Patent N5496766. Mar. 1996. Japan.
3. Мамакин С.С., Юнович А.Э., Ватмана А.Б., Маняхин Ф.И. Электрические свойства и спектры люминесценции светодиодов на основе гетеропереходов InGaN/GaN с модулированно-легированными квантовыми ямами // ФТП. – 2003. – Т. 37, № 9. – С. 1131–1137.
4. Войцеховский А.В., Несмелов С.Н., Кульчицкий Н.А., Мельников А.А. Влияние дислокаций на внутреннюю квантовую эффективность светоизлучающих структур на основе квантовых ям InGaN/GaN // Нано- и микросистемная техника. – 2011. – № 8. – С. 27–35.
5. Shim J.-I., Shin D.-S. Measuring the internal quantum efficiency of light-emitting diodes towards accurate reliable room-temperature characterization // Nanophotonics. – 2018. – September. – P. 1–15.
6. Zang M., Bhattacharya P., Singh J., Hinckley J. Direct measurement of auger recombination in In<sub>0,1</sub>Ga<sub>0,9</sub>N/GaN quantum well and its impact on the efficiency in In<sub>0,1</sub>Ga<sub>0,9</sub>N/GaN multiply quantum well light emitting diodes // Appl. Phys. Lett. – 2009. – Vol. 95, No. 20. – P. 1108.
7. Dai Q., Shan Q., Wang J., Chhajed S., Cho J.M., Shubert E.F., Craford M.H., Koleske D.D., Kim M.-H., Park Y. Carrier recombination mechanisms and efficiency droop in GaInN/GaN light-emitting diodes // Appl. Phys. Lett. – 2010. – Vol. 97, No. 13. – P. 3507.
8. David A., Grundmann M.J. Droop in InGaN light-emitting diodes: A differential carrier lifetime analysis // Appl. Phys. Lett. – 2010. – Vol. 96, No. 10. – P. 3504.

9. David A., Hurni C.A., Young N.G., Craven M.D. Electrical properties of III-nitride LEDs recombination-based injection model and theoretical limits to electrical efficiency and electroluminescent cooling // Appl. Phys. Lett. – 2016. – Vol. 109, No. 8. – P. 3501.

10. Hopkins M.A., Allsopp D.W.E., Kappers M.J., Oliver R.A., Humphreys C.J. The ABC model of recombination reinterpreted: Impact on understanding carrier transport and efficiency droop in InGaN/GaN light emitting diodes // J. Appl. Phys. – 2017. – Vol. 122, No. 23. – P. 4505.

11. Бочкарёва Н.И., Ребане Ю.Т., Шретер Ю.Г. Рост скорости рекомбинации Шокли-Рида-Холла в квантовых ямах InGaN/GaN как основной механизм падения эффективности светодиодов при высоких уровнях инжекции // ФТП. – 2015. – Т. 49, № 12. – С. 1714–1719.

12. Прудяев И.А., Скакунов М.С., Лелеков М.А., Рябоштан Ю.Л., Горлачук П.В., Мармалюк А.А. Рекомбинационные токи в светодиодах на основе множественных квантовых ям  $(Al_xGa_{1-x})_{0.5}In_{0.5}P/(Al_xGa_{1-x})_{0.5}In_{0.5}P$  // Известия вузов. Физика. – 2013. – Т. 56, № 8. – С. 44–47.

13. Sah C.T., Noyce R.N., Shockley W. Carrier Generation and Recombination in P-N Junctions and P-N Junction Characteristics // Proc. IRE. – 1957. – Vol. 45. – P. 1228–1243.

14. Choo S.C. Carrier generation-recombination in the space-charge region of an asymmetrical p-n junction // Solid State Electronics. – 1968. – Vol. 11. – P. 1069–1077.

15. Маняхин Ф.И., Ваттана А.Б., Мокрецова Л.О. Применение механизма рекомбинации Шокли, Нойса, Саа для модели вольт-амперной характеристики светодиодных структур с квантовыми ямами // Светотехника. – 2020. – № 4. – С.

16. Горюнов Н.Н., Маняхин Ф.И., Клебанов М.П., Лукашев Н.В. Импульсный трехчастотный метод измерения параметров заряженных центров в области пространственного заряда полупроводниковых структур // Приборы и системы управления. – 1999. – № 10. – С. 46–49.

17. Shockley W. The Theory of p-n Junctions in Semiconductors and p-n Junction Transistors // Bell Syst. Tec. J. – 1949. – Vol. 28. – P. 435–489.

18. Абдуллаев Ж.С., Гусев М.Ю., Зюганов А.Н., Торчинская Т.В. Параметры глубоких центров в светодиодах AlGaAs,

оценённые методами емкостной и инжекционной спектроскопии // Укр. физ. журнал. – 1989. – Т. 34, № 8. – С. 1220–1224.

19. Войцеховский А.В., Горн Д.И. Механизмы рекомбинации в структурах InGaN/GaN с квантовыми ямами при высоких уровнях возбуждения // Изв. вузов. Физика. – 2015. – Т. 58, № 8/2. – С. 171–173.

20. NSM Archive. Physical Properties of Semiconductors. URL: <http://www.ioffe.rssi.ru/SVA/NSM/Semicond/> (дата обращения: 28.02.2020).

21. Ладыгин Е.А. Действие проникающей радиации на изделия электронной техники. – М.: Советское радио, 1980. – 224 с.



**Маняхин Фёдор Иванович**, доктор физ.-мат. наук, профессор. Окончил в 1973 г. Московский институт электронного машиностроения (МИЭМ). Профессор кафедры «Автоматизированное проектирование и дизайн» НИТУ «МИСиС». Автор и соавтор более 150 публикаций. Награждён грамотой Министерства образования и науки РФ, лауреат конкурса «Золотые имена высшей школы 2018» в номинации «За вклад в науку и высшее образование». Область

научных интересов: полупроводниковая электроника, физика полупроводниковых приборов



**Мокрецова Людмила Олеговна**, кандидат техн. наук, доцент. Окончила в 1978 г. Московский институт стали и сплавов (МИСиС). Доцент кафедры «Автоматизированное проектирование и дизайн» НИТУ «МИСиС». Лауреат конкурса «Золотые имена высшей школы 2018» в номинации «За внедрение инновационных методик преподавания». Область научных интересов: трёхмерное моделирование в световом дизайне

## Расширение области аккредитации Испытательного центра ВНИСИ

Испытательный центр светотехнической продукции ВНИСИ прошёл процедуру расширения области аккредитации в национальной системе аккредитации. В расширении области аккредитации – 92 стандарта (25 из которых – иностранные стандарты МЭК и МКО) и 6 уникальных методик.

Расширение позволяет закрыть полный перечень наиболее востребованных сертификационных испытаний светотехнических изделий и электроустановочных устройств.

Теперь ВНИСИ может проводить измерения и испытания светотехнических изделий и электроустановочных устройств в соответствии с актуальными требованиями ТР ТС 004/2011 «О безопасности низковольтного оборудования».

Среди них стоит особо выделить испытания светотехнических изделий по обязательным требованиям стандартов ГОСТ IEC62471 (IEC62471) «Безопасность ламп и ламповых систем» и ГОСТ IEC62493 (IEC62493) «Оценка осветительного оборудования, связанного с влиянием на человека электромагнитных полей». Новые возможности появились и для испытаний, про-



водимых мобильной лабораторией ВНИСИ в части дорожного и тепличного освещения.

Кроме того, в область аккредитации ИЦ ВНИСИ вошли оригинальные международные стандарты МЭК и МКО, что делает возможным проведение испытаний и оформление протоколов для вывода продукции на Европейский и прочие перспективные рынки.

[www.vnisi.ru](http://www.vnisi.ru)



# Полые световоды – одно из новых направлений развития светотехнической науки и техники (мемуарно-обзорная статья)



**Ю.Б. Айзенберг**

д.т.н., проф., академик АЭН РФ,  
заслуженный изобретатель России

## Предисловие

Настоящая мемуарно-обзорная статья была давно задумана автором, однако, в основном как аналитический обзор, подводящий итоги развития за 50 лет полых световодов как нового направления светотехнической науки и техники. Планировалось собрать материал с широким показом состояния этого направления не только в России, где оно родилось, но и во всём мире. С этой целью планировалось посветить этой работе апрель-июнь этого года.

К величайшему сожалению, вторжение в нашу жизнь пандемии коронавируса, экстренный выезд из Москвы на жёсткий карантин (три дня на сборы), невозможность собрать материал в домашнем архиве и попасть на работу, полностью лишило возможности осуществить задуманное. А перенести сроки написания аналитического обзора на более позднее время было невозможно, т.к. на последующий период запланирована другая значительно более важная работа по подготовке к изданию пакета основных учебных пособий по светотехнике. Кроме того важно учесть, что потенциальный ресурс моего времени из-за возраста не только невелик, но и быстро сокращается, как «шагреновая кожа».

Поэтому я решил всё же написать так, как я могу в этих условиях жёсткого карантина, не имея никаких своих архивных материалов, базируясь лишь только на своей памяти.

Нельзя не упомянуть, что работа сильно усложнялась из-за отсутствия моего любимого секретаря, и тем, что я практически не вижу то, что пишу автоматически.

Я прошу извинения у моих коллег и надеюсь быть понятым.

К сожалению, до полного признания полых световодов светотехническим сообществом и МКО не дожили такие активные участники этой большой и непомерной работы, как Геннадий Борисович Бухман – один из её зачинателей и изобретатель полых световодов, а также Роман Юлианович Яремчук – руководитель работ по подготовке производства КОУ на Тернопольском объединении «Ватра». Светлая память этим замечательным, талантливым людям, они – мои любимые коллеги и друзья.

## Эпиграф

*Два моих жизненных принципа:*

- никогда не возвращайся мысленно к тому плохому, что было в прошлом, думай и работай на будущее и жди от него только хорошего;*
- никогда не напоминай людям о том хорошем, что ты для них сделал, умный и благородный сам отблагодарить торопиться, завистнику и человеку злобному хоть масло на голову лей – он же тебе врагом будет.*

## Аннотация

В статье дан обзор краткой истории работ по созданию новых систем с полыми световодами, основные этапы разработки и освоения их производства. Приведены найденные конструктивные решения и выполнен анализ их достоинств и недостатков. Рассмотрены работы по дальнейшему развитию направления полых световодов в светотехнической науке и технике. Кратко изложены результаты работ зарубежных учёных и фирм в конце XX и начале XXI века.

### Ключевые слова

Полые световоды, введение солнечного света в здание, гелеостатно-световодные системы, плоские клиновидные системы освещения, призматические световоды, «Helliobus», «Arthellio».

## История и результаты работ

Середина XX века была характерна фронтальным и быстрым прогрессом науки, технологии и строительства. Проиллюстрируем это четырьмя примерами:

1. Исключительно крупномасштабное развитие систем транспортирования по трубопроводам нефти и газа с нарастанием объёма прокачки и её дальности. Это вызвало массовое строительство взрывоопасных компрессорных станций.

В связи с отсутствием специальных светильников, требовалось разработать новую систему освещения. Взрыв на компрессорной станции чреват был финансовыми и политическими проблемами для государства.

2. В этот период были разработаны новые исключительно мощные взрывчатые материалы, специальное технологическое оборудование и созданы осо-

бые производства. Причиной взрывов могли стать как наличие в помещениях световых приборов, а также электрических сетей и электроустановочных изделий. Взрыв такого производства оставлял лишь глубокий котлован без здания, людей и оборудования. Выход в обоих указанных случаях мог заключаться в вынесении источников света и электрических сетей из освещаемого помещения.

3. Термоконстантные цеха заводов электронной промышленности с требованиями к постоянству температуры  $\pm 0,5$  °С зимой и летом, днём и ночью. При этом необходимо было освещать большие производственные площади, и при обычном освещении для удаления тепла, выделяемого ИС, требовалась система кондиционирования огромной мощности.

4. Помещения с особыми требованиями по чистоте, где на 1 м<sup>3</sup> воздуха недопустимо наличие более одной пылинки.

Анализ показал, что и для этих двух последних групп производств также целесообразно устройство осветительных установок с вынесенными из помещений источниками света и электрическими сетями.

Над этой проблемой при сохранении требований к качеству и высокому уровню равномерной освещённости бились в то время многие ведущие проектировщики, в том числе Г.М. Кнорринг, С.А. Клюев, Л.А. Циперман, М.Ю. Каплинская и др.

У меня к тому времени за 10 лет работы во ВНИСИ (1954–1964 гг.) был лишь один случай проектирования взрывоопасного склада с баллонами ацетилена. Освещение было решено осуществлять прожекторами заливающего света через окна. Установка была неудачной, т.к. слепящее действие было исключительно велико, а окна ухудшали пропускания света из-за пригорания к ним пыли и грязи.

В конце 60-х и начале 70-х годов XX века мне удалось, руководя отделом освещения промышленных и общественных зданий и световых приборов во ВНИСИ, собрать и систематизировать базу данных обо всех выпускаемых в нашей стране светильниках этого назначения.

В связи с этим ко мне стали обращаться с вопросами многие проектировщики осветительных установок, в т.ч. выдающийся мэтр проектирования – Глеб Михайлович Кнорринг. У нас на этой основе образовалось творческое сотрудничество, переросшее в дружбу.

Однажды мне позвонил Г.М. Кнорринг, попросил принять сотрудника Киевского отделения ГПИ «Тяжпромэлектропроект» Г.Б. Бухмана, приехавшего к нему за советом по разработке нового типа светового прибора. Г.М. Кнорринг сказал, что разработкой светильников он не занимается, а предложение Г.Б. Бухмана представляется ему нереальным, прежде всего из-за вероятно малого КПД. И предложил Г.Б. Бухману приехать в Москву во ВНИСИ к Ю.Б. Айзенбергу – специалисту по световым приборам.

Ко мне приехал Геннадий Борисович Бухман, который оказался чрезвычайно симпатичным человеком, прошедшим через всю Великую Отечественную Войну (много старше меня), работающим проектировщиком освещения в Киеве.

После первого разговора с ним и моего тщательного продумывания ситуации я понял, что при использовании полых световодов возможно получить целый ряд перспективных и интересных решений осветительных установок и, конечно, в первую очередь тех четырёх групп помещений, имеющих важное государственное значение, о которых я думал все время.

Суть его предложения – разработать прибор с использованием опыта А.Н. Чиколева, осветившего склад боеприпасов на Охтенском заводе под Санкт-Петербургом с помощью торцевого световода в виде металлической трубы зеркализированной изнутри. Выходной торец этой трубы находился в помещении, которое надо было осветить, а входной – вне здания, и в этот торец попадал свет от электрической дуги. При этом Г.Б. Бухман предполагал, что если вырезать отверстие вдоль трубы, то через него будет выходить свет и освещать всё помещение. Но этот принцип, в совершенно новом исполнении с использованием трубчатого полого световода из пластмассы с оптической щелью вдоль всего световода, может добиться значительно большего эффекта в промышленных масштабах.

При этом Г.Б. Бухман привёз авторское свидетельство с названием «Светильник-световод», выданное ему патентной службой нашей страны в 1964 г. за № 181023.

После двухнедельного обсуждения с Г.Б. Бухманом его предложения и возможных различных новых вариантов решения, мы сконцентрировались на следующих проблемах:

1. Надо ли разрабатывать светильник или систему освещения с полым световодом;
2. Если да, то для широкого применения или для освещения специальных помещений с сугубыми требованиями к окружающей среде;
3. Какие и когда должны применяться материалы для изготовления СД, предназначенных для производственных помещений с различными длинами пролётов (от 6 м до 18 м и более);
4. Какой коротко-дуговой источник света большой мощности (не менее 700 Вт) должен быть применён во вводном устройстве;
5. Какой должен быть использован отражатель для введения потока света в вводной конец световода? Возможно, это должна быть зеркальная коротко-дуговая лампа с наименьшей по диаметру колбой и встроенным зеркальным отражателем, что необходимо для формирования концентрированной кривой силы света при достаточно большой мощности в короткой дуге.

По многим вопросам наши мнения расходились, но в целом мы сошлись на том, что для коротких пролётов (6 м, 12 м) целесообразно и возможно использовать световоды из экструдированной, пропускающей свет пластмассы. Большие длины невозможны из-за необходимости утолщать стенки трубы для обеспечения её жёсткости, повышается её вес и цена. В крайних случаях возможно изготовление световодов этих длин из эластичной, прочной плёнки. Для более длинных пролётов необходимо делать световоды особо большой длины, что делает воз-

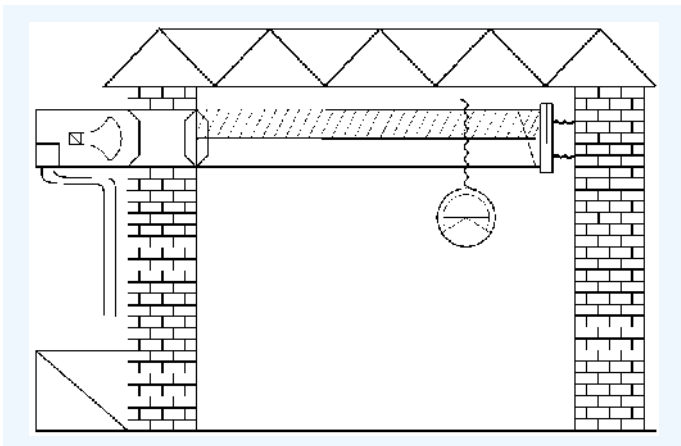


Рис. 1. Схема осветительной установки со световодом для специальных условий применения

возможным использование только эластичных плёнок. При этом для длинных световодов также исключается возможность использования тонкостенных, полученных методом горячего прессования алюминиевых конструкций.

После детального обмена мнениями и обсуждения перспектив дальнейшего развития нового направления с различными ответвлениями от горизонтально располагаемых цилиндрических образцов мы пришли к некоторому консенсусу.

1. Вариант металлических световодов для общего освещения производственных помещений (при горизонтальном расположении световодов в помещениях с пролётами 6 м, 12 м, 18 м) и высокими уровнями требуемой освещённости был отвергнут сразу и окончательно из-за дороговизны, сложности, большого веса, опасности падения и негодной эстетики.

2. Полые световоды (ПС) должны быть выполнены в виде жёсткой конструкции экструдированной из ПММА или ПК особенно для длин 6 и 12 м, или из эластичной сверхтонкой плёнки (25–50) мк (плёночный вариант допустим только при отсутствии возможности получения экструдированной и светопропускающей пластмассовой трубы с большим диаметром, больше 200 мм, что было невозможно в нашей стране в тот период времени). Внутри световода устанавливается полуцилиндрический алюминиевый зеркальный отражатель с углом раскрытия оптической щели  $\pm 30^\circ$  или  $\pm 45^\circ$  (это и дало название этим устройствам – «щелевой световод»). Световод должен быть герметичен и иметь на входном торце прозрачную шайбу из силикатного стекла.

Другая группа ПС – это устройства для введения солнечного света в помещение, где естественного света нет или не хватает. При длине световодов до 7,8 м, вертикально расположенные жёсткие световоды должны иметь на входном торце (на крыше зданий) простейшие устройства для введения солнечного света и на другом торце световода рассеиватель естественного света в помещении. При высоте световодов от 8 до 15 м и необходимости освещения различных помещений, вокруг световода на различных уровнях необходимо иметь на входном торце гелиостатно-световодную систему перехвата солнечного

излучения и введения его в вертикальный световод. При этом должно быть предусмотрено возможность введения в тот же световод в тёмное время суток искусственного света, автоматически включаемого при нехватке естественной освещённости.

В многочисленных случаях, когда освещаемые помещения имеют нормальную среду или не имеют специфических требований, вводные устройства могут устанавливаться в помещении в один ряд со световодом у его вводного конца.

Как правило, соотношения длины световода и его диаметра ( $l/d$ ) составляют 30/1 или 35/1 при оптической щели с углами раскрытия отражателя  $\pm 45^\circ$  и в зависимости от зеркального коэффициента отражения  $\rho$  отражателя (алюминий типа *Miro* фирмы *Alanod* имел зеркальный  $\rho \geq 0,95$ ). Все приведённые здесь цифровые данные вставлены позднее по результатам проведённых исследований и разработок. Также необходимо отметить, что приведённые выше соображения являются не только результатом дискуссий с Бухманом, в них учтены пожелания и идеи соавторов изобретения, высказанные ими в дальнейшем. Я считал необходимым собрать здесь всё воедино, т.к. до этого все это можно было находить только в разных местах, многочисленных статьях и двух книгах.

После прихода к общему выводу, мы с Г.Б. Бухманом увидели в мечтаниях поочерёдно все четыре указанных выше помещения с особыми требованиями:

- хорошо освещённые продолговатыми объёмными цилиндрическими светящими телами помещения;
- не оказывающее слепящего действия, создающее равномерное распределение освещённости;
- при этом источники света и электрические сети отсутствуют в освещаемом помещении (рис. 1).

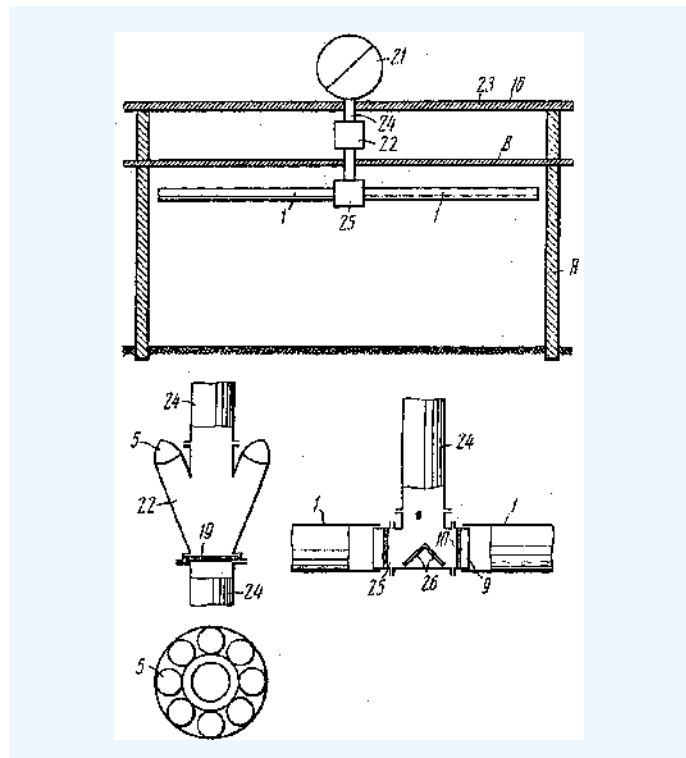


Рис. 2. Введение солнечного света в помещение, управления и изменения направления естественного света



Рис. 3. Освещение павильона товаров народного потребления на ВДНХ в Москве десятью линиями световодов КОУ 3×700 длиной по 36 м каждый в линии

Безопасно, надёжно, долговечно, и это – главное, а совсем не КПД, который для меня до этого был «священной коровой», за каждый большой процент я готов был сражаться.

Это означало необходимость иметь новые принципы проектирования, методы расчёта.

После всего этого мы навсегда стали коллегами и близкими друзьями. Вторым дальнейшим направлением стало введение солнечного света внутрь зданий (рис. 2).

Организовав срочное обследование двух групп предприятий, таких как химические комбинаты и стекольные заводы, мы пришли к печальным выводам. В те годы на отечественных химических заводах не было экструдеров пластмасс, на которых можно было бы изготавливать трубы из ПММА диаметром больше 150 мм, максимум 200 мм. Ни один стекольный завод, даже такой передовой как Лыткаринский, не брался за изготовление стеклянных параболических отражателей, зеркализированных высококачественным алюминием, с большим коэффициентом отражения, необходимых для металлогалогенных ламп (МГЛ) мощностью 700 Вт и более.

Практически это полностью решило вопрос будущей конструкции системы освещения. Оставались только плёнки и зеркальные лампы с самой короткой горелкой и высокой световой отдачей, т.е. МГЛ.

Нашими первыми реальными действиями стало:

1. Эскизное проектирование, изготовление и испытания макетов, а также начало разработки методов расчёта.

2. Подготовительные работы для формулирования заявок на патенты зарубежным странам.

3. Подготовка и проведения совещаний с ведущими проектировщиками страны.

Для начала макет полового световода был испытан на огромном котле ТЭЦ для подсвечивания цифровых данных о температуре сильно разогретой поверхности котла (авторское свидетельство номер 269302 1970 г. «Взрывобезопасный электрический светильник-световод» при участии Г.Б. Бухмана, Ю.Б. Айзенберга, Е.Б. Шефтель и Г.Л. Козаковой). Одновременно Г.Б. Бухман начал разработку методов светотехнического расчёта полых световодов и осветительных установок с ними, а я приступил к работе в патентной библиотеке и формированию творческого коллектива. Попытался найти какие-либо работы, которые могли быть нам противопоставлены, если мы подадим заявку на изобретение. Огромную помощь мне оказывал патентовед ВНИСИ М.И. Бергер и эксперт госкомитета по изобретениям Т.М. Мельниченко.

Не найдя патентов по нашей проблеме, предвосхищавших нашу идею, мы принялись работать над формулировкой нашей заявки для отправки в патентные ведомства ведущих стран мира.

После этого мне пришлось засесть, как оказалось, за чрезвычайно сложную работу – формулирование на языке семи стран текста заявления на патенты во всех ведущих странах, переводы на русский язык всех противопоставлений и подготовку ответов несостоятельности противопоставлений на их языке; в том числе, с приезжавшими на встречу в Москву патентными поверенными из Германии и Англии, с которыми было необходимо провести личные встречи обсуждения сути нашего изобретения и необоснованности противопоставлений и ответить на вопросы, и всё это на английском и немецком языках, которым я владел или с помощью переводчика. Каждый такой патент был нами получен, начиная с 1975 г. и на это уходило от трёх до четырёх лет. Это была тяжелейшая и сложная работа (патенты США, Англии, Германии, Франции, Италии, Японии, Швеции и Швейцарии).

Первый патент США был получен на моё имя и Г.Б. Бухмана.

Одновременно я сформировал творческий коллектив в составе талантливых молодых специалистов В.М. Пятигорского, А.А. Коробко, Н.Н. Софронова (все ВНИСИ) и, конечно же, Г.Б. Бухмана и Р.Ю. Яремчука.

При этом Г.Б. Бухман и А.А. Коробко занимались светотехническими расчётами самих световодов и осветительных установок с ними, а также участвовали в проектировании этих установок. В.М. Пятигорский руководил работами по конструированию систем типа КОУ с плёночными каналами и вопросами их монтажа. Н.Н. Софронов занимался разработкой зеркальных металлогалогеновых ламп типа ДРИЗ 700 и их внедрением в производство ПО «ЛИСМА», а также производством ПРА для этих ламп на Кадошкинском электротехническом заводе. Р.Ю. Яремчук руководил подготовкой производства КОУ на ПО «Ватра» в г. Тернопале и самим их производством.

Наряду с этими предприятиями нельзя не упомянуть Химкомбинат в г. Владимире, освоивший про-

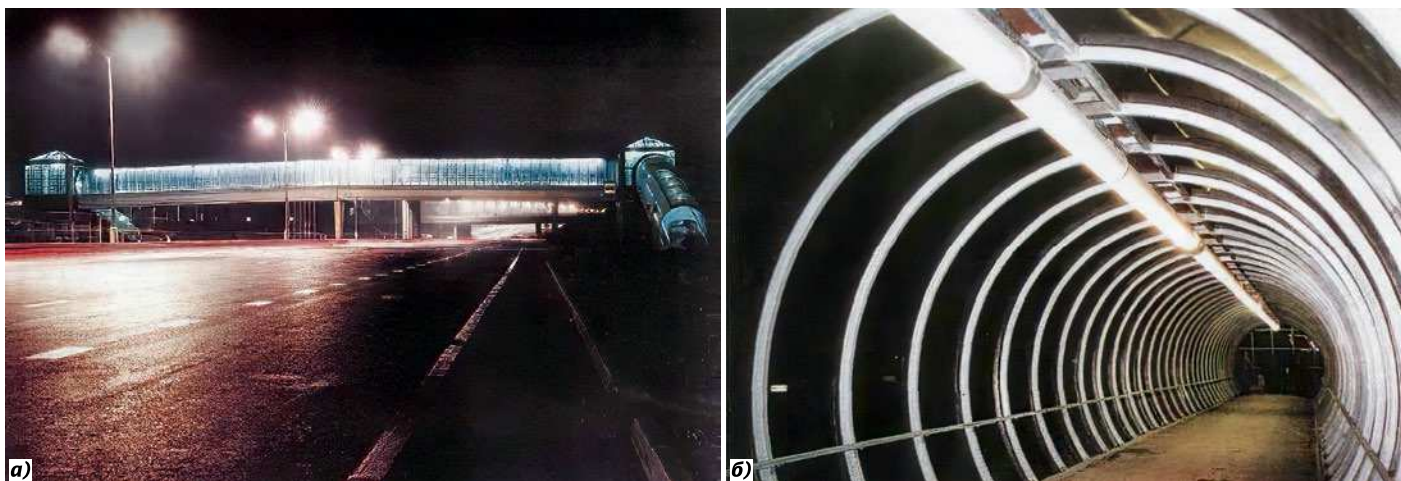


Рис. 4. Надземные переходы через Московскую кольцевую автостраду с помощью жёстких световодов экструдированных из ПММА длиной 12 м: а – вид перехода с кольцевой дороги; б – вид тоннеля изнутри

изводство полиэтилентерефтолатной (ПЭТФ) тонкой прочной плёнки для первых световодов, которые были оборудованы в универмаге «Вешняки» в Москве и на станции «Чкаловская» в Московском метрополитене. В.В. Сурженко добился внедрения более тонких ПЭТФ плёнок (25 мк) на НПО «Пластик» в Москве.

Из этой группы специалистов-энтузиастов я длительное время тщетно добивался создания лаборатории с конструкторским бюро во ВНИСИ. Мне пришлось обратиться в отдел машиностроения Совмина, оттуда получить распоряжение за подписью Бородавченко о развитии работ по ПС во ВНИСИ и создании для этого специальной лаборатории с КБ и макетным участком.

До того как приступить к подготовке производства, мной были сделаны доклады на НТС ведущих проектных организаций Москвы – ГПИ «Тяжпромэлектропроект», «Минмонтажспецстрой» и «Электропроект».

Задачей этих докладов было выяснить отношение ведущих специалистов страны:

- к новому направлению в светотехнике;
- оценить возможную область применения КОУ;
- выслушать замечания и предложения.

Интересно отметить, что совет «Тяжпромэлектропроект» был проведён в г. Мозыре непосредственно на насосной станции нефтепровода «Дружба», где была смонтирована первая экспериментальная установка с макетными образцами световодов КОУ 1×700 под руководством В.М. Пятигорского. Проведение этих обсуждений со специалистами было крайне полезным и весьма удачным.

### Освоение производства и серийный выпуск

До начала производства мы провели испытания первого образца световода в г. Тернополе в помещении огромного сварочного цеха высотой 20 метров. К вечеру там собралось всё руководство завода, все конструктора и технологи, работавшие с нами по этому направлению, Г.Б. Бухман, я и В.М. Пятигорский.

Пятигорскому вместе с О.Б. Ладькой отводилась важнейшая роль – установить и включить под потолком образец световода. К сожалению, у них долго не

получалось, сильно стемнело, многие начали ворчать, высказывать различного рода сомнения, как вдруг часам к 11 ночи вспыхнула яркая полоса световода слегка голубого цвета. Впечатление было потрясающее, кто-то кричал «Ура!!!», большинство хлопало в ладоши, но всё не могли оторваться от этого удивительного зрелища. Так начался долгожданный счастливый выход в жизнь нашего изобретения.

До 1995 года ПО «Ватра» выпустило 52 тыс. комплектных осветительных устройств типа КОУ 1×700 и 3×700, которыми были оборудованы крупнейшие объекты, в том числе и, прежде всего, те четыре объекта, с которых начиналась статья. В числе важнейших объектов с осветительными установками входили следующие системы:

1. 350 компрессорных взрывоопасных станции нефтепровода «Дружба»;
2. все особо взрывоопасные цеха предприятий по изготовлению взрывчатых веществ;
3. большое термоконстантное производство (20 тыс. кв. метров, КОУ 3×700) в Москве печатных плат для электронных приборов (проект украинского филиала «Тяжпромэлектропроект» под руководством Г.Б. Бухмана, г. Киев);
4. особо чистые помещения предприятий электронной промышленности (г. Томилино).

В ходе этих работ выявилась целесообразность использования световодов и в ряде общественных зданий. Примером сказанного являются следующие объекты:

1. Павильон Товаров народного потребления на ВДНХ в Москве (рис. 3), это здание высотой 24 м и длиной 108 м, в котором надо было создать высокую равномерность освещённости,  $E = 300$  лк, и обеспечить удобную и безопасную эксплуатацию, было освещено десятью линиями световодов КОУ 3×700. Каждая из линий была образована тремя двухсторонними вводными устройствами световодами по 36 м. Отличительной особенностью этой установки было то, что установка вводных устройств световода была осуществлена всего на четырёх мостках поперечных линиям световодов, на этих же мостках была проложена вся электрическая часть установ-

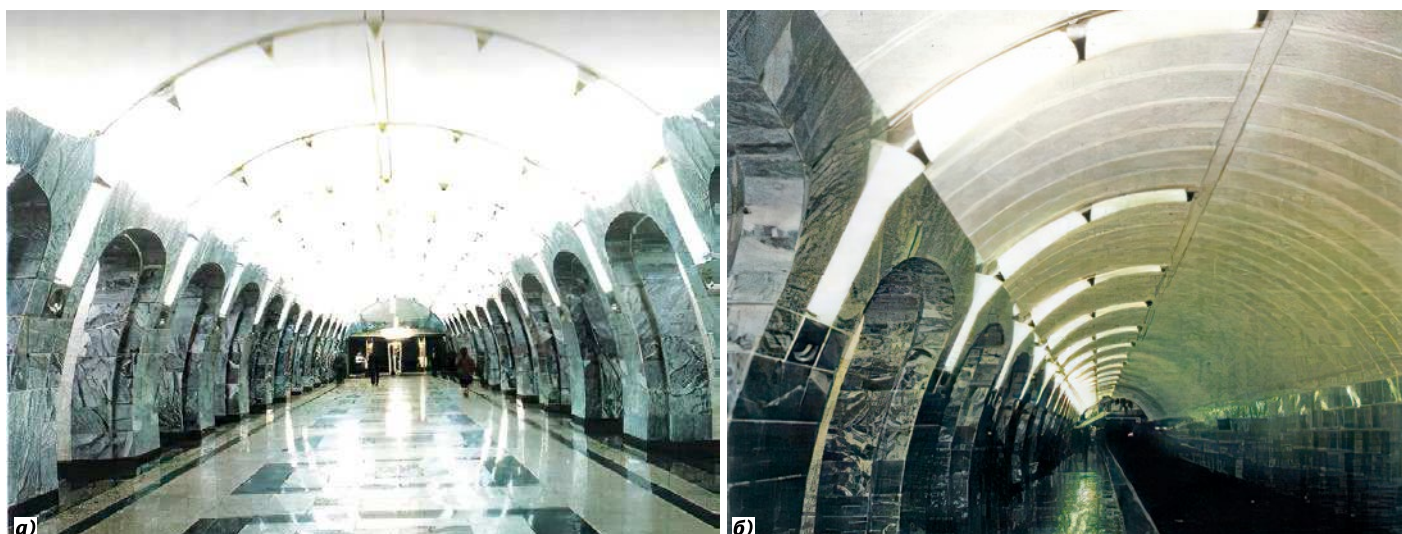


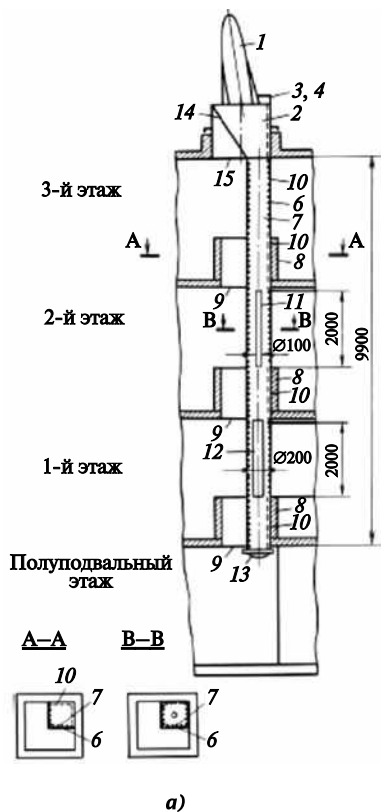
Рис. 5. Станция «Чкаловская» на Московском метрополитене, освещённая арочными световодами: а – центральный зал; б – платформенный зал

ки с экономией многих километров проводниковых материалов. С этих же мостков осуществлялось полное техническое обслуживание. В проектировании этого уникального объекта принимал участие А.А. Коробко.

2. 32 пешеходных перехода через Московскую кольцевую автостраду, на каждом из которых было установлено по 4 жёстких экструдированных из ПММА световода длиной 12 м (рис. 4 а, б) (2×6 с единым двухсторонним вводным устройством) и диаметром 250 мм, фирмы *Sélux* по проекту МОСГОРСВЕТА и ВНИСИ под моим руководством. Это обеспечивало высокое качество освещения, отсутствие слепящего

действия и равномерное распределение освещённости в этом низком длинном помещении, и совершенно новый световой дизайн всего перехода в тёмное время суток. При этом 24 светильника с лампами типа ДРЛ в пылеводонепроницаемом исполнении, которые были предусмотрены фор проектом, заменялись. Недостаток этого проекта заключался в том, что в конструкции австрийских переходов в крыше перехода было выполнено продольное вентиляционное отверстие, слегка прикрытое лёгкой крышкой, что приводило к попаданию пыли и дождевой воды на верхнюю часть световодов и требовало их периодической очистки.

Рис. 6. Осветительное устройство «Helliobus» в четырехэтажной школе *Vopartshoff* в Санкт-Галлене (Швейцария): а – схема общего вида установки; б – гелиостатно-световодная система; в – светящиеся колонна световода, проходящая через все четыре этажа школы



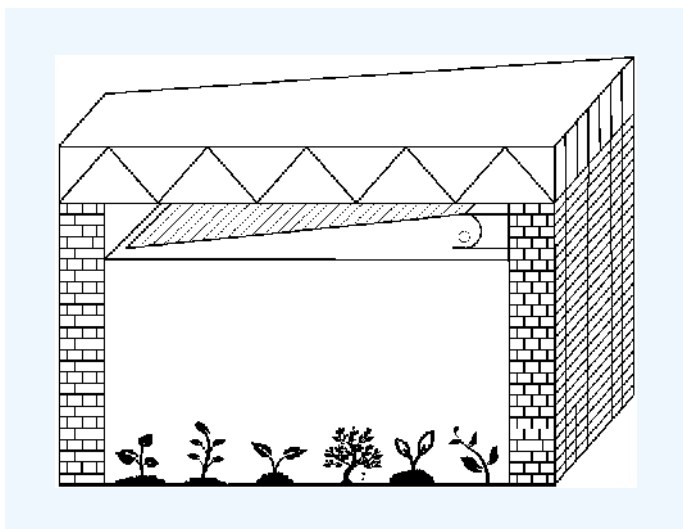


Рис. 7. Плоские клиновидные световоды в темнице для выращивания рассады овощей

3. Арочные световоды на станции «Чкаловская» на Московской станции метрополитена по проекту архитектора Н.А. Алёшиной и реализованные группой В.М. Пятигорского (рис. 5 а, б). Идея и выполнение проекта В.М. Пятигорского принципиально изменившая систему обслуживания и придавшую абсолютно новый световой дизайн станции, позволивший признать её одной из лучших станций в Московском метрополитене. Наряду с новым интересным световым дизайном эта установка обеспечивала резкое снижение затрат на эксплуатацию, т.к. располагалась на небольшой высоте, что не требовало никаких подъёмников.

Заметным событием явился пуск в эксплуатацию в 1995 году в г. Санкт-Гален (Швейцария) гелиостатной световодной системы *Helliobus*. Её вертикальный световод пронизывал все четыре этажа школы, освещая на каждом из них центральную рекреацию, не имевшую ранее естественного освещения (рис. 6 а, б, в). При этом был использован жёсткий вертикальный световод из ПММА с сечением (600×600) мм, высотой 10,5 м. Установка спроектирована по проекту ВНИСИ. Гелиостатный узел разработан А.А. Коробко с передачей солнечного света, а в его отсутствие искусственного света зеркальных ламп МГЛ расположенных в водных устройствах у входного торца световода. И то и другое излучение проходит по одному и тому же каналу световода. При этом искусственный свет автоматически включается при недостаточной освещённости естественного света в тёмное время суток. Общий проект «*Helliobus*» осуществлён под моим руководством.

Удивительной и приятной особенностью этой установки является непрерывное и динамическое изменение значений яркости и её распределения по поверхности световода в соответствии с происходящими на небе изменениями. Различные по форме и яркости облачности, появление движения по поверхности световода теней от облаков или радуги привлекательны не только для детей (в школе во время перемены), но и для учительского состава.



Рис. 8. Освещение центрального проспекта Барселоны плоскими клиновидными световодами в виде светильников наружного мачтового освещения

Приглашение создать установку *Helliobus* в г. Санкт-Гален мы получили после публикации моей статьи в немецком журнале «*Licht*» на эту тему, опубликованную мной после неудачных моих обращений к ряду ведущих проектных организаций нашей страны, отмечавших интересность нового предложения, но невозможность его реализации по многочисленным разным причинам (в основном бюрократического характера).

После публикации статьи мной было получено приглашение от ряда фирм г. Санкт-Гален приехать и сделать доклад в муниципалитете и ответить на ряд вопросов муниципалитета.

После этого муниципалитет принял решение о строительстве установки в школе, которое должно было быть проведено фирмами *Büler-Scherler* и *Signer*. На международной выставке по охране окружающей среды в г. Берне (Швейцария) макет установки *Helliobus* получил золотую медаль. Патент на установку был получен несколько позже от патентного ведомства Швейцарии (CH690780A5).

В это время институт посетили Министр электротехнической промышленности Н.А. Антонов и председатель комитета по изобретениям И.Н. Наяшков, которые дали высокую оценку проведённым нами работам. Главный изобретатель страны высказал мысль, что наше изобретение одно из самых выдающихся в 1996 году в стране. После этого было опубликовано в газете «Известия» две статьи о работах в области полых световодов.

Рис. 9. Световоды на шпигеле небоскрёба в Филадельфии



мися телами не только металлогалогенных, но и натриевых ламп ВД и модулей светодиодов могут работать с клиновидными световодами. При этом под клиновидным световодом обеспечивается равномерное распределение освещённости как поперёк помещения, так и на любой высоте световода. Разработке и исследованию этих устройств была посвящена диссертация В.М. Пятигорского.

Это устройство нашло первое применение в темнице Тимирязевской академии г. Москва, где исследования были проведены под руководством профессора-биолога В.М. Лемана, результаты исследования роста рассады овощей выращенной в темницы под ПКС показало существенное повышение, на (20–30)%, биомассы выращенных растений и ускорения сроков её созревания на ряду с этим темницы, освещённые ПКС, показали возможность отопления их с помощью тепла выделяемого источниками света, что очень важно для северных районов нашей страны. Для этих районов использование темниц вместо теплиц чрезвычайно перспективно в связи с коротким световым днём, полугодовым отсутствием солнца и низкими температурами окружающего воздуха. Широкое использование ПКС нашло в Испании в виде светильников уличного освещения, где несколько сотен таких приборов освещают в Барселоне центральный проспект и площадь Колумба. К сожалению, надо констатировать отсутствие лицензий на изготовление ПКС и утаивание информации, хотя разработка выполнена на основе нашего патента АС 615312 «Плоский световод» 1978 год.

Мы привлекли к работе предприятия:  
– ПО «Ватра» (Тернополь) – изготовление и поставка системы КОУ;  
– ПО «Светотехника» (Лисма) – лампы ДРИЗ-700 Вт;  
– ПЭТФ плёнки (Владимирский Хим. Комбинат), а так же НПО «Пластик» (Москва)– оболочка световода;  
– Кадошкинский завод – ПРА для ДРИЗ – 700.

### **Плоские клиновидные полые световоды и осветительные устройства (рис. 7, 8)**

Дальнейшим развитием направления полые световоды явилась идея создания плоских клиновидных приборов и устройств. Эти устройства имеют полуцилиндрическое зеркальное вводное устройство с источником света и верхнюю плоскую зеркальную поверхность наклонно расположенную по отношению к нижней горизонтальной плоскости поверхности из материалов, пропускающих свет с рассеянием. Для этих приборов размеры светящихся тел источников света и их количество не имеют такого критически важного значения, поскольку размещаются не вдоль оптической оси отражателя вводного устройства, а поперёк, что не требует обеспечения максимально концентрированной КСС. Поэтому мощные источники света с достаточно длинными светящи-



Рис. 10. Зал космонавтики в Смитсоновском музее Вашингтоне



## Призматические световоды

Призматические световоды – устройства, получаемые методом экструзии светопропускающей пластмассы с продольными призматическими рёбрами, имеющими форму призм с углом  $90^\circ$  при вершине призм на внешней поверхности трубчатой конструкции. Устройство, создающее равномерное излучение в пространстве, непригодное для освещения рабочих помещений. Для решения задач наличия призматических световодов прямого света для освещения в нижней полусфере пространства необходимо надеть сверху зеркальный отражатель, что превращает устройство в щелевой световод, запатентованный нами во всех передовых странах на пять лет раньше, а публикация была начата на десять лет раньше. С этой точки зрения вызывает удивление выдача в 1980 году патента на это устройство патентным ведомством США, без ссылки на наш патент.

Возможные достоинства: большое соотношение  $l/d$  (до 50 и больше) лишь при условии ввода резко сконцентрированного светового потока, для чего необходимо иметь почти точечный источник света при малом диаметре световода и большом зеркальном параболическом отражателе. Это всё возможно при генерации световых потоков, необходимых для создания высоких уровней освещённости. Наилучшее рабочее положение – вертикальное, при котором эффективно используется равномерное распределение света, при этом не нужно пропускать большое значение световых потоков и можно ограничиться малыми диаметрами и длинами. Наиболее целесообразная область применения – архитектурные обрамления вертикальных колонн или шпилей зданий и др. (рис. 9). Призматические световоды были с успехом показаны на выставке ракетной техники в Вашингтоне (рис. 10).

Решением этой проблемы пытался заняться всемирно известный концерн 3М (Миннеаполис–*Sent Pohl*, США) совместно с Канадской фирмой *Tirsistem*. По заказу этих фирм, несколько американских и шведских компаний разработали и внедрили производства безэлектродных серных лампы (с шаровым с ножкой светящим телом  $\varnothing 29$  мм и мощностью 2,0 кВт). При этом была сделана попытка при большой концентрации мощности в малом объёме добиться надёжной работы с помощью быстрого вращения светящего тела и обдува его холодным чистым воздухом. Все это привело к созданию сложной и дорогой конструкции с малой надёжностью работы в эксплуатационных условиях, хотя первые результаты испытаний показали весьма обнадеживающими (например, освещение 70-метрового пролёта дороги под зданиями ДОЕ в Вашингтоне) вся эта попытка закончилась полным провалом в связи со снятием с производства серных ламп и ПРА для них и потерей инвестиций.

Недостатки призматических световодов: более дорогая конструкция световода, низкие эксплуатационные характеристики, быстрое загрязнение при горизонтальном расположении, трудности очистки теряющей от загрязнения свои характеристики кон-



Рис. 11. Гибридный осветительный ГОК «LED+Solarspot» комплекс состоящий из центрального световода и группы светильников Томской фирмы «Световые системы»

струкции, затруднённая изготовление световодов большого диаметра.

Объявленное в качестве «Революции в светотехнике» направление оказалось закрытым и прекратило существование. Вместе с тем длительное время продолжалась рекламная компания призматических световодов с попыткой доказать их преимущество над световодами с гладкими поверхностями.

### Не только успехи, но и потери

Мне представляется, что будущим читателям из всего сказанного может показаться, что работа по созданию новых осветительных приборов и их применению проходили спокойно, быстро, без сучка и задоринки, к сожалению, это было далеко не так. У нововведения оказался целый ряд мощных противников.

Рассмотрев первую редакцию этой статьи, в которой перечислялись многочисленные поступки направленные на срыв работы, её дискредитацию и задержку, я пришёл к выводу о недостойности такого поведения, похожего на сведение счетов с умершими людьми и «объявление вендетты» их потомкам. Ниже упомянуты лишь три случая, которые действительно нанесли тяжёлый вред работе, о которой я рассказываю.

Нельзя не упомянуть о создании в МКО по нашему предложению двух новых технических комитетов по полым световодам: ТС 3–30 «Полые световоды для искусственного освещения и области их применения», а так же ТС по «ПС для введения в здания естественного света». Председателем ТС 3–30 я был утверждён конгрессом МКО для подготовки публикации МКО на эту тему. Второе событие исключительной важности после посещения творческого коллектива министром М.А. Антоновым – «Минэлектротехпром» вышел с предложением в комитет по Ленинским и Государственным премиям о награждении этой важной наградой – Госпремией авторского творческого коллектива. Наши материалы после многочисленных докладов на советах различного уровня и прохождения разных комиссий были представлены на заключительном заседании комитета. Однако они не были рассмотрены в связи с отсутствием представителя руководства организации, где выполнялись работы.

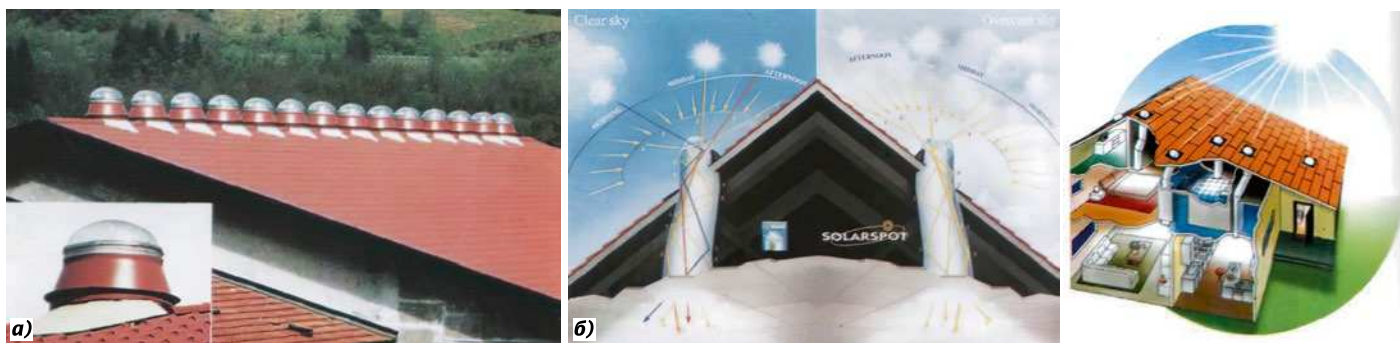


Рис. 12. Естественное освещение внутренних помещений с помощью жёстких полых световодов, на примере коттеджей, освещённых итальянской фирмой *Solar Spot* под руководством *Genaro Broccale*: а – многорядное освещение световодами – вид одного из водных устройств; б – два варианта введения солнечного света в тёмные помещения коттеджей

Это было необходимо по уставу комитета для представления работы и ответа на вопросы.

На следующий год «Минэлектротехпром» сделал повторное представление, и тем не менее ситуация полностью повторилась. Всё это больно отразилось на членах творческого коллектива и сильно задержало ход проводимых работ.

Неожиданным «горным обвалом» для меня послужило полученное мной в Норвегии по завершению заседания моего технического комитета сообщения о том, что дальнейшее моё руководство комитетом невозможно в связи с полученной информацией из России о том, что ресурсы на финансирование поездок председателя комитета исчерпаны. А по уставу МКО проведение заседания при отсутствии председателя невозможно. Я тут же подал в отставку и с изумлением узнал, что должностную обязанность это место учёный секретарь комитета отказался в результате интриг. Могу сказать, что в дальнейшем это закончилось драматически для содержания публикации МКО.

В 1976 году я получил неожиданное сообщение от Министерства о запрете выезда на некоторое время за рубеж на любые светотехнические конференции, симпозиумы, совещания, а об отмене этого решения

будет сообщено мне дополнительно. Фактически запрет действовал 13 лет (1976–1989 гг.). А это был период наиболее творчески плодотворного времени! И это был уже не «камнепад», а «извержение вулкана». И это-то в самый трудный и важный период развития работ!

Я сделал для себя чёткий обобщённый вывод: в человеческом обществе есть две большие группы:

- большинство из людей, на которых держится и развивается это общество, и это часто внешне неласковые и недобрые люди, но готовые поддержать, помочь, спасти.

- другая – менее многочисленная группа – внешне добрых ласковых и благожелательных, а внутри – завистливых и злобных людей. Их задача либо примазаться к успешному делу или человеку, а если это не вышло, навредить, задержать развитие, снизить успех.

Длилось это до 1989 г., и освободился я от этих «наручников» только благодаря отчаянным и энергичным своим действиям. По моей оценке, 1990 г. сыграл важную роль в развитии направления полых световодов. Этот период был насыщен важными событиями.

Началось всё с успешного доклада о полых световодах на конгрессе *IESNA (Illuminating Engineering Society of North America)* в Балтиморе (США). Этот конгресс, в котором участвовали специалисты США, Канады и Мексики, но и многие ведущие европейские учёные, имел большой резонанс в светотехническом мире. Я стал получать много приглашений повторить доклад в университетах США, Шотландии, Финляндии, Германии и от крупнейших фирм Европы, таких как *Trilux Lenze, Norka, Selux* (Германия), *3M* (США). Очень важна достигнутая после доклада договорённость об издании в США в Нью-Йорке издательством «Alertonpress» английской версии журнала «Светотехника» с названием «*Light & Engineering*».

Почти тоже я могу сказать о проведённой Внешторгом операции под названием «Продажа лицензии на производство полых световодов Италии и Японии», ни какие подробности об этой операции мне не известны, крупная сумма была выплачена держателям патентов, которыми в те годы было наше государство в лице Минэлектротехпром и ВНИСИ. Творческая группа была награждена несколькими компьютерами (ни каких деталей этой операции я не знаю). Не могу закончить повествование об основных этапах



Рис. 13. Освещение здания *Copriano* в Милане с помощью полых световодов с корзинообразным центральным узлом

развития полых световодов в нашей стране, не упомянув о том, что происходит в настоящее время, связанное с распадом великого государства СССР, развалом экономики страны и резкого сокращения финансирования науки. Это привело к прекращению работ по ПС во ВНИСИ и уходу ряда членов творческого коллектива в другие организации, прекращением выпуска КОУ на ПО «Ватра» в Тернополе из-за превращения Украины в независимое государство и прекращения всех межзаводских связей. В последующем мне пришлось продолжать работу по развитию полых световодов другого класса с зарубежными фирмами, имевшими возможность получения экструдированных пластмассовых каналов практически любого диаметра.

Большую радость доставляет возрождение и дальнейшее развитие полых световодов, которое получило направление в 2017–2020 гг. в Томске и Краснодаре фирмой «Световые системы». Под руководством серьёзного учёного и делового человека, профессора А.Т. Овчарова, проведён комплекс работ по исследованию, разработке и оснащению производства нового вида изделия на базе световодов под названием ГОК (Гибридный осветительный комплекс) *LED Solarspot* (рис. 11). Осветительные установки с этими приборами имеют высокие технико-экономические характеристики и интересный дизайн. Могу только пожелать дальнейшего развития этим работам.

И последнее, о чём я должен рассказать как бывший член и руководитель творческого коллектива по исследованию и разработке одного из новых направлений светотехнической науки – полых световодов. Посещая с докладами ряд крупнейших фирм Европы и США с целью международной популяризации наших разработок, мы с А.А. Коробко установили хорошие контакты с фирмой 3M (Миннеаполис – Сент-Поул, США). Наряду с этим мне удалось установить творческие контакты с фирмой *Sélux* и *Büler-Scherler* (Санкт-Гален, Швейцария).

К большому сожалению, контакты с 3M были прекращены после краха с призматическими ПС и сержными лампами. Что касается *Sélux*, то под моим руководством были разработаны серии устройств с жёсткими световодами из экструдированного ПММА для внутреннего освещения и вариант для наружной установки, с односторонним и двухсторонним вводным устройством.

Что касается совместного творчества с фирмами *Büler-Scherler* и *Signar*, то главным его результатом было создание уникальной установки *Helliobus* для освещения центральных рекреаций четырёхэтажной школы без естественного света *Bopartshoff Schule* в Санкт-Галлен, Швейцария, о чём рассказано выше.

Переходя к краткому обзору состояния работ по ПС в странах, где были получены и опубликованы наши патенты за первые 15 лет (1975–1990 гг.), были проведены ряд научных исследований, а так же созданы и активно действует ряд фирм. Защищены 9 диссертаций, посвящённых ПС. В России – 4 (1 доктор и 3 кандидата) во ВНИСИ, в Шотландии – *Napir University* Эдинбург, Германия – Берлинский университет совместно с *Sélux* – две диссертации, Миланский поли-



Рис. 14. Два световода 15–20 м длиной на *Potsdamen Platz* в Берлине для создания впечатления зрительной связи наружного и внутреннего пространства подземного торгового центра и прогулочной зоны

технический университет и фирма *Solar Spot*, в Австралии – Университет Мельбурна.

Были организованы 3 фирмы, успешно действующие по настоящее время. Это фирмы «*Solar Tuebe*» (Калифорния, США), «*Solar Spot*» (Милан, Италия) и «*Monodrow*» (Англия), выпустившие каждая более чем по несколько десятков тысяч комплектов коротких полых световодов с наружным простейшим приёмником (солнечный свет на наружном торце световода и рассеивателями на выходном торце в тёмном помещении, преимущественно коттеджей, где естественный свет отсутствует, рис. 12 а, б). Сюда можно так же отнести международный концерн 3M США, который освоил за этот период производство призматических световодов.

Интересно отметить, что, когда после чтения доклада в Беркли-Лоуренс университете я попытался познакомиться с Калифорнийской фирмой, после того как назвал свою фамилию, мне было категорически отказано. Кстати, с этим эффектом скрывательства украденного мне приходилось сталкиваться многократно. Например, на выставках (*Light and Building*), где дважды я видел на стендах выставленные под очень громкими рекламными плакатами светильники уличного освещения на базе плоских клинообразных световодов. После моих предложений встретиться с хозяином и просьбой посетить производство, получал отказ под разными предлогами. При этом на

следующий день на стенде уже не было ни образцов, ни плакатов.

В конце прошлого века и в начале настоящего за рубежом был проведён в развитие наших исследований целый ряд интересных разработок. В качестве примеров можно назвать несколько установок. Установка «ArtHellio» в Берлинском политехническом университете на кафедре светотехники, (Dr.A. Rosemann) и Sélux (D. Albert). Эта установка вводила солнечный свет для освещения центральной лестницы с помощью жёсткого вертикально стоящего полого световода. В Италии, здание «Carpano» в Милане (рис. 13), с системой с полыми световодами, где в середине линий горизонтальных световодов встроена «корзина света», играющая роль светосборника и распределителя света. Система из двух наклонно расположенных световодов, вводящих солнечный свет в подземный торгово-развлекательный центр. Световоды длиной ориентировочно (15–20) м на площади Potsdam Platz (фирма Signer, Берлин), (рис. 14).

На этом можно было завершить моё затянувшееся повествование, но я не могу этого сделать без рассказа об удивительных, чудесных людях среди которых велась эта деятельность. Ну хотя бы о трёх основных действующих лицах.

Прежде всего, о главном авторе изобретения «Полые световоды» – Геннадии Борисовиче Бухмане (об этом я всегда писал в моей книге, статьях и докладах). Мягкий, добрый, исключительно талантливый, творческий человек. Абсолютно незащищённый человек-мечтатель из другой – будущей – эпохи.



Хочу дополнить его творческий портрет кратчайшим рассказом ещё об одном его изобретении осветительного устройства для операционного освещения кислородной барокамеры хирурга профессора Амосова, где хирург проводил самые опасные операции на сердце, повышая шанс на успех благодаря возможности насыщения крови кислородом прямо из окружающей в барокамере среды. При этом надо учесть, что кислород один из самых взрывоопасных газов.

Владимир Михайлович Пятигорский – самый мой близкий сотрудник и аспирант. Человек редкого творческого таланта, невероятной энергии, удивительно жизнерадостного характера, решающего быстро и правильно любые стоящие задачи. Успехом всех разработок КОУ с эластичными плёночными каналами и выполнением образцового монтажа новых установок (совместно с бригадой своих помощников Горовым,



Галинским и Деевым) мы обязаны именно Владимиру Михайловичу. А ассистентом Пятигорского по конструированию на ПО «Ватра» и разработке рабочей документации был О.Б. Ладыка.

Алексей Александрович Коробко – друг и полная противоположность «огненному» Пятигорскому. А.А. Коробко – человек основательный, вдумчивый, спокойный и осторожный, большого творческого



таланта. Никаких скоропалительных решений, всё должно быть взвешено, проанализированы все возможные события при будущем монтаже и эксплуатации. Всё должно быть рассчитано и прежде всего светотехнические характеристики. Работать с Коробко спокойно, очень приятно и надёжно.

Хочу выделить три важных вклада в нашу работу:

– разработка методов расчёта полых световодов и осветительных установок с ними;

– светотехническая схема гелио-осветительной установки, использованной при разработке «Helliobus»;

– участие в проекте освещения павильона товаров народного потребления десятью линиями световодов и использования всего четырёх мостков для установки двухсторонних вводных устройств и принципиально другой системы обслуживания.

Выработка и расчёт совместно с Пятигорским поднаправления «Плоские полые клиновидные световоды». Написал и защитил великолепную диссертацию. По моему мнению, давно заслуживает присвоения ему звания доктора наук.

Это не деловая характеристика для передачи в отдел кадров, это – эмоциональное ощущение к людям, которыми я восхищаюсь и благодаря которым я провёл самые счастливые годы своей творческой жизни, но одновременно и самые тяжёлые.

Говоря о трудностях этого периода моей жизни, я имел в виду то, что всё более увлекаясь проблемами полых световодов, я был готов бросить все остальные дела, но быстро понял невозможность этого. Моя основная работа была в то время во ВНИСИ, где я руководил научным отделом из пяти лабораторий. Бросить это всё в разгар работы было бы предательством, на которое я не способен.

В это же время после двухгодичных собеседований, сбора справок и отзывов я совершенно неожиданно получил приглашение в ЦК КПСС, где мне сообщили, что я назначен по рекомендации профессора В.В. Мешкова и директора ВНИСИ Т.К. Глазунова главным редактором общесоюзного научно-технического журнала «Светотехника». Это был декабрь 1968 г., с началом выполнения обязанностей с января 1969 г.

Оставалось только одно: собраться со всеми силами, перестроится, мобилизовать все резервы здоровья и браться за это, выполнить всё на хорошем уровне, и вовремя.

Так я и сделал.

Благодарю всех прочитавших и – в особо большой степени – тех, кто отозвался на этот труд.

P.S. Выражаю искреннюю благодарность за огромную помощь при написании этой статьи Е.А. Булгаковой и Е.Н. Истюнкиной.

**Ю.Б. Айзенберг**  
30 мая 2020 года,  
на коронавирусном карантине  
пос. Удельное, МО

# Увидеть невидимое!

Каждый год в России инвалидами по зрению становятся около 45 тысяч жителей страны. С возрастом проблемы со зрением возникают практически у каждого человека. Несмотря на инвалидность, большинство людей хотят оставаться полноправными участниками культурной жизни. Поэтому одной из наиболее актуальных становится задача по созданию общедоступной среды для инвалидов по зрению (в том числе и в музеях). Слабовидящие люди отмечают, что, даже если острота зрения стремительно снижается, ценным является каждый процент. «Если сохранилось всего 5 % зрения, хочется в первую очередь увидеть предмет, а не осматривать его руками», – отметила в интервью участница проекта «Увидеть невидимое!» Светлана Болотина.

С октября 2018 года сотрудники музея «Огни Москвы» работают над проектом «Увидеть невидимое!», который стал победителем конкурса «Музей 4.0» благотворительной программы «Музей без границ» Благотворительного фонда В. Потанина». Основная цель проекта – повысить доступность музеев для слабовидящих посетителей. Почти два года сотрудники музея «Огни Москвы» проводят исследования по восприятию музейных экспозиций слабовидящими посетителями, пытаются определить основные проблемы и предложить пути их решения. Наибольшее значение в вопросе доступности музеев для слабовидящих посетителей играет освещение.

Слабовидящие посетители музеев имеют разные особенности зрения, поэтому очень сложно создать условия, при которых все будут себя одинаково комфортно чувствовать в музее. Несмотря на это, сотрудникам музея «Огни Москвы» удалось выделить несколько правил, благодаря которым освещение может помочь сделать музеи более доступными для слабовидящих посетителей.

1. При входе в музей важно, чтобы не было резких перепадов освещённости. Освещение во входной зоне должно быть комфортным. При этом нужно помнить, что слабовидящему человеку требуется больше времени на адаптацию зрения. Поэтому важно предоставить слабовидящему посетителю 2–3 минуты, чтобы глаза привыкли к искусственному свету.

2. Свет может стать хорошим навигатором по музею для слабовидящих посетителей. Например, в музее Владимира Высоцкого от входной двери до экспозиции установлены подвесные светильники, которые образуют на полу световую дорожку, которая помогает ориентироваться в пространстве.

3. Для слабовидящих посетителей верхняя и нижняя ступени лестницы должны быть обозначены контрастной полосой (обычно жёлтого цвета). Но, учитывая историческую значимость музейных зданий, не везде это можно сделать. Из наблюдений за посещением музеев слабовидящими, сотрудники музея «Огни Москвы» сделали вывод, что большинство людей, имеющих проблемы со зрением, могут определить расположение лестницы, если ступени хорошо подсвечены (особенно это важно для первой и последней ступени на лестничном марше). Слабовидящие эксперты также отмечают, что очень удачным является вариант, когда вдоль перил под поручнем располагается светодиодная лента. Таким образом создаётся дополнительное освещение на лестнице; свет указывает направление движения; видны повороты.

4. Среди слабовидящих встречаются люди с пониженной и повышенной светочувствительностью (светобоязнь). Посетители музеев с пониженной светочувствительностью предпочитают находиться в просторных помещениях, со светлыми стенами и потолком, с высоким уровнем освещённости. Им комфортно в залах, где есть естественное освещение. Общие рекомендации по освещению пространства для слабовидящих составляют 500–750 люкс для интенсивной зрительной нагрузки. Конечно, в му-





зее сложно повысить уровень освещённости залов до данной цифры. Люди со светобоязнью предпочитают находиться в помещениях с приглушённым светом. Во время реализации проекта «Увидеть невидимое!» было отмечено, что посетителей с повышенной светочувствительностью в основном раздражают только попадающие в их поле зрения точечные источники света. Например, лампа накаливания без плафона, даже если лампа задимирована и нить накаливания светится не очень ярко. Ярко, равномерно освещённая витрина, в которой скрыты источники света, не вызывает у людей со светобоязнью негативных эмоций.

5. Для слабовидящих посетителей важно создать большой контраст между музейным предметом и фоном, на котором он выставляется.

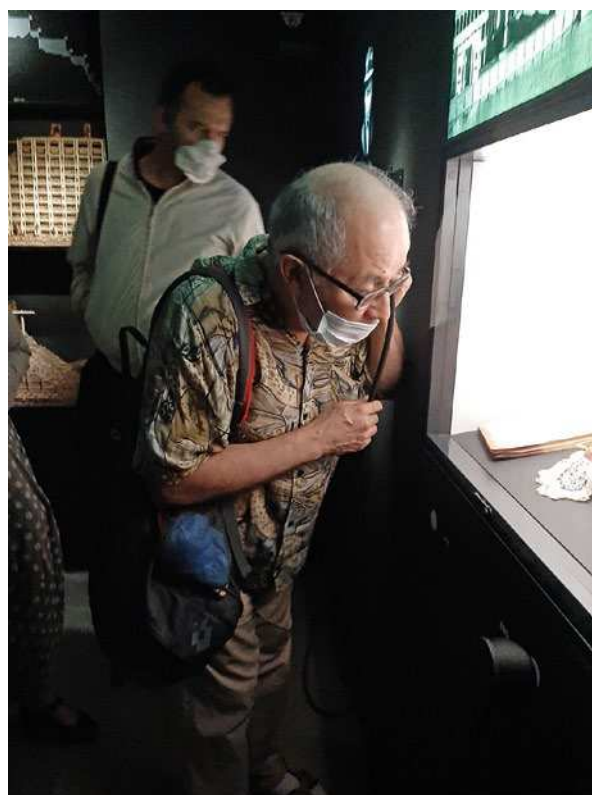
6. Несмотря на то, что большинство слабовидящих людей имеет низкую светочувствительность, предпочитают находиться в хорошо освещённых помещениях, музейные экспонаты лучше воспринимаются при акцентном освещении, в залах, где практически отсутствует общее освещение. Исходя из норм освещения музейных предметов, для предметов с высокой светочувствительностью (ткань, бумага) уровень освещённости не должен превышать 50 люкс. Возникает вопрос: могут ли слабовидящие посетители при таком свете рассмотреть музейные предметы? Проведённые сотрудниками музея «Огни Москвы» исследования показали, что даже при освещённости 50 люкс большая часть посетителей, имеющих особые потребности по зрению, мо-

гут увидеть предмет, если отсутствует общее освещение (или уровень общего освещения очень низкий 1–3 люкс); предмет расположен на контрастном фоне; расстояние от лица посетителя до предмета составляет 30–50 см. Также было отмечено, что более комфортно слабовидящим посетителям осматривать экспонат в тёмном зале при освещённости 150–300 люкс. При освещённости свыше 300 люкс в некоторых случаях во время исследования слабовидящие эксперты жаловались на дискомфорт. Свет, отражённый от предмета, раздражал их глаза.

Для создания доступной среды в музее можно рекомендовать временные акции, во время которых будет увеличиваться уровень освещённости экспонатов. Например, музей «Мэри Роуз» в Англии раз в месяц проводит специальную акцию *Relaxed Opening Mornings*. В это время освещение в музее на 2 часа повышается на максимальный уровень. Такие условия наиболее благоприятны для слабовидящих людей, а также посетителей с аутизмом и с деменцией.

7. Использование современных систем освещения может также способствовать адаптации экспозиции музеев для слабовидящих посетителей. Например, если при проведении экскурсии, экскурсовод сначала увеличит освещённость в зале, чтобы посетители смогли освоиться в новом пространстве, а потом плавно снизит его, чтобы слабовидящие люди могли сконцентрировать взгляд на объекте показа.

В новой экспозиции музея Владимира Высоцкого некоторые витрины не имеют постоянного освеще-





щения. Чтобы подсветить экспонаты, посетителям нужно нажать кнопку, расположенную рядом с этикеткой. После чего в витрине загорается акцентный светильник, свет от которого направлен на предмет. Этикетки выполнены из чёрного пластика с вырезанными на нем тестами. Одновременно со светом внутри витрины загорается подсветка этикетки. Надпись становится яркой и контрастной, хорошо читается слабовидящими посетителями.

8. Всегда важно, чтобы проекты освещения музейного пространства были выполнены грамотно. Ошибки, допущенные светотехниками, могут сделать осмотр экспозиции для посетителей с хорошим зрением некомфортным, а для людей, имеющих особые потребности по зрению невозможным. Пример: Горизонтальная витрина с экспонатами освещена светильником, подвешенным на потолке на шинопроводе, на расстоянии 1,5 метров от витрины. Когда посетитель подходит к витрине, образуется тень от его фигуры. В результате уровень освещённости экспонатов в витрине с 50 люкс снижается до 20 люкс. Одновременно было зафиксировано, что даже люди, имеющие не столь значительные проблемы со зрением, при освещённости 20 люкс не видят предметы.

9. Для слабовидящих посетителей очень важно равномерное освещение музейного экспоната. Пример: текст аннотации к выставке написан на стене крупным шрифтом на контрастном фоне. Однако уровень освещённости надписи очень неравномерный. В центре освещённость 100 люкс, по краям надписи – 5–10 люкс. В итоге слабовидящие посетители не видят часть слов, не могут прочитать текст.

10. Осмотр музейной экспозиции слабовидящими становится невозможным, если в глаза попадает сильный блик или непосредственно источник света. Возникает слепящий эффект, после чего посетителю требуется значительное время, чтобы восстановить зрение.

11. Чем меньше остаток зрения у человека, тем более болезненно воспринимаются блики. Во время исследования было зафиксировано, что посетитель

музея с небольшим остатком зрения при освещении акцентным светильником советской новогодней открытки, имеющей слегка глянцевую поверхность, видел только изображение по краям. В центре вместо картинки видел большое белое пятно. При смене положения светильника, расположения его под разными углами, восприятие предмета слабовидящим экспертом не изменилось. Следовательно, для людей с особыми потребностями по зрению важно, чтобы иллюстративные материалы, этикетки были напечатаны на матовой бумаге.

12. В рамках проекта было также изучено, свет какой цветовой температуры более благоприятно воспринимают слабовидящие посетители. По результатам заочного опроса большинство респондентов ответили, что им нравится тёплый свет (64 % опрошенных). 10 % опрошенных ответили, что больше нравится нейтральный свет. 6 % предпочитают холодный. 20 % – ответили, что для них неважно, светильники с какой цветовой температурой используются для освещения. На практике, при проведении исследования, сложилась совсем другая картина. 47 % опрошенных ответили, что более комфортно они себя чувствуют в помещении, освещённым светильниками с цветовой температурой 4000 К. 32 % выбрали тёплый свет, 16 % – холодный, 5 % – не имеет значение.

Первые исследования по восприятию слабовидящими людьми музейных предметов при разном освещении (общем и акцентном) провели под руководством сотрудников музея «Огни Москвы» учащиеся московской школы № 1554 в рамках своих школьных проектов. Во время эксперимента слабовидящие школьники должны были сначала рассмотреть репродукцию Жоржа де Ла Тура «Шулер с бубновым тузом» при общем освещении, потом при общем в сочетании с акцентным освещением, и в завершении только при акцентном. При общем освещении многие участники исследования не могли рассмотреть репродукцию или видели только 3 фигуры, изображённые на картине. При акцентном освещении слабовидящие школьники различали все четыре фигуры, изображённые на картине. Один из слабовидящих учащихся младших классов решил, что он принимает участие не в научном исследовании, а в шоу, где показывают фокусы.

Получается, что инженера – светотехника, который может грамотно выполнить проект музейного освещения, можно назвать волшебником, так как благодаря его мастерству даже слабовидящие посетители могут увидеть невидимое!

**Н.В. Потапова,**  
**директор музея «Огни Москвы»**

6 августа 2020 года в Москве прошла Всероссийская научно-практическая конференция. Это событие стало одним из самых ярких и первым в светотехнической отрасли в этом году. Мероприятие прошло очно с соблюдением всех рекомендаций Роспотребнадзора и дало возможность встретиться и организовать диалог между всем участникам светотехнического рынка с целью обсуждения и решения наиболее острых и насущных вопросов и проблем отрасли, а также всестороннее повышение компетентности её работников.

С докладами выступили представители ведущих российских и иностранных светотехнических компаний – производителей и поставщиков светотехнической продукции и средств измерений, научных и контролирующих организаций, разработчики, светодизайнеры, архитекторы.

На конференции были подняты острые вопросы о процессах, проходящих в отечественной светотехнической отрасли в последнее время, о необходимости своевременного внесения изменений в стандарты и нормативные требования из-за быстрого развития технологий, были представлены доклады о передовых технологиях, разработках и опыте их внедрения.

Конференция была поделена на несколько параллельных секций, в рамках которых представлялись доклады по следующим тематикам:

- Благоустройство городской световой среды;
- Торговое освещение;
- Промышленное и складское освещение;
- Искусственное освещение жилых и общественных зданий.

После окончания секций докладов был проведён круглый стол «Светодиоды для современных осветительных приборов». Сделано в России?», на котором была активная дискуссия с участием производителей. На круглом столе были подняты важные вопросы о локализации производства светодиодов на территории России, о соответствии в будущем российского светодиода образцам международных компаний поставщиков светодиодов, экономической обоснованности и соответствующих постановлений правительства.

В секции «Благоустройство городской световой среды» выступил практикующий светодизайнер Масленников Александр (*MPEI Light Lab*) с докладом на тему «Современное архитектурное освещение и его роль в развитии имиджа городов», в рамках которого осветил основы создания световой концепции кварталов и городов и подчеркнул важность и актуальность создания единой световой среды. Дмитрий Сутягин (*INTILED*) рассказал о проблемах, с которыми столкнулись специалисты компании при освещении регионов с экстремальным климатом и о том, какие модификации необходимо проводить со светильниками в части комплектующих для того, чтобы они не выходили из строя и соответствовали заявленным характеристикам при работе в таких тяжёлых условиях эксплуатации. Андрей Киричок (ООО «Светосервис ТМ») представил доклад о применении систем управления освещением для оптимизации комфорта уличного освещения на примере АСУНО «БРИЗ-Smart Light». Семён

Бурукин (ГК Инкотекс) представил систему управления освещением *ASTRO* и отметил особенности современного подключения контроллера к светильнику с помощью международного разъёма *NEMA socet*. Марат Баширов (Рэйлюкс) рассказал об опыте проведения энергосервисного контракта в городе Казань, совмещённым с проектом комплексного освещения городской среды.

В рамках секции «Промышленное и складское освещение» Екатерина Ильина (*Ledil*) подняла вопрос снижения слепящего действия складских светильников. Для решения этой задачи было предложено распределить габаритную яркости по большой поверхности светильника, сформировать жёсткие защитные углы без применения шторок и решёток, за счёт высокоэффективной оптики, снизить показатель дискомфорта *UGR* путём создания дополнительной подсветки потолка, для снижения уровня контраста между светодиодными светильниками и тёмным потолком, направить свет на стеллажные полки и, таким образом, минимизировать прямую засветку глаз.

В секции «Торговое освещение» одним из интересных докладов была презентация Татьяны Тришиной (*TRION*) о реализации нейромаркетинга в освещении торговых пространств. Нейромаркетинг – комплекс методов изучения поведения покупателей, воздействия на него и эмоциональных и поведенческих реакций на это воздействие, использующий разработки в областях маркетинга, когнитивной психологии и нейрофизиологии. Нейромаркетинг основан на психофизических экспериментах. Так для исследования предпочтений покупателей в Терминале V австрийского города Лаутерах в январе 2013 года была установлена 3D симуляция модного магазина одежды. Эта комплексная инсталляция позволяла создать испытуемым иллюзию действительного пребывания в магазине (рис. 1). Также был создан комплекс стандартизованных лабораторных настроек, позволяющих объективно сравнивать реакции всех участников. В рамках этой 3D визуализации испытуемым было продемонстрировано 20 различных сценариев освещения, отличающихся различными комбинациями тестируемых световых параметров (цветовая температура, световой поток, светораспределение (направленное или рассеянное), кривая силы света, контраст яркости, контраст цветности).

В секции «Искусственное освещение жилых и общественных зданий» Еленой Ильиной (ООО «ВЕГА-эко»)

## Исследование Zumtobel и Nymphenburg



Рис. 1. Исследование Zumtobel и Nymphenburg





Рис. 2. Интегративное освещение

в рамках своего выступления были подняты вопросы исключения из оценки освещения всех показателей качества освещения и ограничения контингента работников, на рабочих местах которых контролируется уровень освещённости. В настоящее время оценка освещения не проводится практически на всех рабочих местах предприятий оборонного комплекса, чёрной и цветной металлургии, электроэнергетики, включая атомные станции, автомобилестроения, производства стекла, пищевой, химической и нефтехимической промышленности, промышленности строительных материалов, лесной, деревообрабатывающей и целлюлозно-бумажной промышленности и других видов деятельности, где выполняются работы с объектом различения более 0,5 мм. А соответственно нет контроля, нет и фактического обеспечения нормативных требований к освещению! Также в рамках этой секции Александр Карев (ООО «МГК «Световые Технологии») представил доклад на тему «Интегративное освещение общественных и жилых зданий». Вопросы проектирования» (рис. 2). Интегративное освещение – концепция освещения, обеспечивающего не только визуальный комфорт, но и физическое и психологическое благополучие людей в зданиях. Это перспективное направление существенно раздвигает рамки традиционной светотехники, требует внедрения новых стандартов, средств измерения специфических параметров, специальных приёмов проектирования. Интегративное освещение – освещение, параметры которого изменяются во времени по заранее заданному алгоритму или в соответствии с внешним воздействием в реальном времени. Эта концепция максимально использует возможности естественного света, реализуя гибкие сценарии совмещённого освещения, при варьировании спектральным составом и интенсивностью. Управление освещением по зональному принципу, учёт результатов самообучения осветительной установки на реальном объекте, не только создаёт условия для продуктивной работы и отдыха, но и позволяет экономить электроэнергию. Поскольку внедрение концепции интегративного освещения – это тренд развития светотехнической индустрии на предстоящее десятилетие Александр Карев осветил такие вопросы в своей презентации, как анализ основных количественных и качественных параметров, используемых при проектировании интегративного освещения, привёл действующие стандарты и руководящие документы, представил алгоритмы расчётов и примеры проектирования и реализации.

*Т.В. Мешкова*  
Старший научный редактор

## Световое шоу в Санкт-Петербурге

В честь 75-летия со дня окончания Второй мировой войны 3 сентября 2020 года в ночное небо на высоту 600 метров над Санкт-Петербургом поднялись 2200 световых беспилотника (дрона).



Уже с девяти вечера у комплекса «Петровский» стали собираться жители и гости города, чтобы увидеть и сфотографировать это необычное шоу, хотя его можно было наблюдать и из других мест города.

На тёмном небе световые дроны создавали различные, эффектные и оригинальные образы: голубь мира, военные самолёты, ордена Отечественной войны, война-красноармейца и другие красочные световые картины.

В этот же день прошла «Эстафета вечного огня» от Пискаревского мемориального кладбища до дороги жизни. Ведь 8 сентября 1941 началась легендарная и тяжелейшая



блокада города, которая длилась в течение 900 дней и ночей, и при освобождении от которой 27 января 1944 года от фашистских захватчиков погибло 1,95 миллионов ленинградцев и Воинов Советской армии.

*Е.А. Лесман,*  
инженер – энергетик, корреспондент журнала  
«Светотехника» в Санкт-Петербурге

## Новые книги по светотехнике

### Л.П. Варфоломеев «Введение в светотехнику»

Готовится к изданию книга «Введение в светотехнику» известного российского специалиста-светотехника Л.П. Варфоломеева.

В книге новом труде Л.П. Варфоломеева изложены современные представления по всем основным разделам светотехнических знаний, а именно:

- природа света, световые и лучистые величины и единицы их измерения;
- источники света;
- управляющие устройства и электроустановочные изделия;
- светотехнические материалы;
- требования российских и международных нормативных документов, простейшие приёмы расчёта осветительных установок;
- световые приборы и критерии их оценки, эксплуатация осветительных установок, аварийное и наружное освещение.

Рассмотрены области светотехники, не связанные со зрением (свет и здоровье, облучательные установки, солнечная энергетика).

Кандидат технических наук Л.П. Варфоломеев – автор целого ряда книг по светотехнике и многих научных публикаций. Более 30 лет работал во ВНИСИ, возглавлял лабораторию комплексного светотехнического оборудования замкнутых экологических объектов, долгое время был научным редактором журнала «Светотехника», а также выступал научным редактором третьего и четвёртого изданий «Справочной книги по светотехнике».

Книга предназначена для студентов, изучающих светотехнику, а также для работников светотехнических предприятий и сетей реализации светотехнических изделий. Объём книги – около 300 страниц, выпуск книги запланирован на IV квартал текущего года, стоимость – 500 рублей.

### А.А. Коробко «Утилитарное наружное освещение»

Книга А.А. Коробко «Утилитарное наружное освещение» посвящена вопросам освещения транспортно-пешеходной сети дорог в городских и сельских населённых пунктах, а также автомобильных дорог общего пользования, расположенных вне населённых пунктов.

Книга состоит из четырёх глав. В первой главе дано развёрнутое определение понятию «Утилитарное наружное освещение» (УНО); показана взаимосвязь стационарного искусственного освещения с безопасностью дорожного движения; освещены различные аспекты видимости в условиях сумеречного зрения, характерного для УНО; определены основные показатели, регламентирующие дорожное освещение. Вторая глава посвящена основной области применения УНО – освещению дорог и улиц. Подробно освещены вопросы классификации освещаемых объектов (транспортных и пешеходных зон) и нормативные требования к освещению. Достаточно полно изложены такие разделы как методология расчёта дорожного освещения, техника и средства освещения объектов УНО. В третью главу вынесены вопросы освещения автодорожных тоннелей. Это связано со специфическими особенностями данного вида освещения, главная из которых обусловлена необходимостью учёта адаптации зрения водителя при въезде в тоннель в дневное время. В заключительной главе излагаются вопросы контроля и измерения параметров дорожного освещения на основе как традиционных (стационарных), так и новых (мобильных) методов измерения.

Важно отметить, что весь материал изложен в соответствии с современными требованиями к УНО, регламентируемыми соответствующими национальными стандартами и базирующимися на международных нормативно-технических документах и мировой практике.

Автор монографии является ведущим специалистом в области нормирования и расчёта установок дорожного освещения. Принимал непосредственное участие в разработке действующей национальной нормативной базы в области УНО, а также в написании разделов по дорожному и тоннельному освещению в третьем и четвёртом изданиях Справочной книги по светотехнике. Является основным разработчиком российской компьютерной программы Light-in-Night для проектирования дорожного освещения, представляет Россию в Международной комиссии по освещению (МКО), являясь членом отделения 4, деятельность которого охватывает вопросы наружного освещения.

Книга предназначена для специалистов, занимающихся вопросами проектирования, монтажа и эксплуатации установок дорожного освещения, а также будет полезна студентам технических вузов, обучающимся по специальностям, связанным с дорожным освещением.

Выпуск книги запланирован на IV квартал текущего года, стоимость – 500 рублей.

### М.Е. Клыков «Управляющая аппаратура для светодиодов и разрядных ламп»

В IV квартале 2020 года выйдет в свет книга М.Е. Клыкова «Управляющая аппаратура для светодиодов и разрядных ламп», посвящённая вопросам расчёта и проектирования устройств включения разрядных ламп и светодиодов.

Книга состоит из трёх частей. Первая часть посвящена пускорегулирующим аппаратам для люминесцентных ламп и разрядных ламп высокого давления. Вторая часть – устройствам управления светодиодами. В третьей приведены примеры практического построения пускорегулирующих аппаратов для люминесцентных ламп и устройств управления светодиодами. Во введении приведена краткая историческая справка развития пускорегулирующей аппаратуры и устройств управления лампами в привязке к развитию источников света.

Весь материал изложен в соответствии с современными требованиями к пускорегулирующим аппаратам и устройствам управления, регламентируемыми соответствующими национальными стандартами и базирующимися на международных нормативно-технических документах и на мировой практике.

Автор монографии является ведущим специалистом в области разработки и внедрения электронных пускорегулирующих аппаратов и импульсных зажигающих устройств для разрядных ламп и устройств включения светодиодов, предназначенных для промышленных, административных и транспортных светильников. Является соавтором 37 авторских свидетельств, 83 статей и докладов в научно-технических журналах и на научно-технических конференциях. Участвовал в написании разделов по пускорегулирующей аппаратуре в третьем и четвёртом изданиях Справочной книги по светотехнике. На протяжении многих лет является внештатным референтом и редактором реферативного журнала «Светотехника и инфракрасная техника».

Книга предназначена для студентов, обучающихся по специальности «Светотехника» и может быть также полезна инженерно-техническим работникам, которые не являются специалистами в области управляющей аппаратуры для источников света, но связаны с эксплуатацией таких устройств. Стоимость книги – 500 рублей.

Заказать книги можно в редакции журнала «Светотехника», заполнив заявку на сайте [www.l-e-journal.com](http://www.l-e-journal.com).



**СветоСервис**  
ГРУППА КОМПАНИЙ

**ООО «Светосервис-Подмосковье» :**  
инновационные решения в освещении для столицы и регионов



**Полный спектр услуг в области**

- Проектирования
- Монтажа
- Обслуживания
- Управления Системами Функционального, архитектурного и ландшафтного освещения



ООО «Светосервис - Подмосковье»  
129626, Москва,  
1-й Рижский пер., 6



[svetoservis.ru](http://svetoservis.ru)



+7 (495) 786-85-82

Оформить подписку, купить журнал или статью можно на сайте  
журнала «Светотехника» [www.l-e-journal.com](http://www.l-e-journal.com)  
(периодичность издания 1 раз в 2 месяца)

### Журнал «СВЕТОТЕХНИКА»

| Печатная версия                        |             |
|--|-------------|
| Журнал                                 | 1 100 руб.  |
| Годовая подписка (6 экз.)              | 6 000 руб.  |
| Электронная версия                     |             |
| Статья                                 | 400 руб.    |
| Журнал                                 | 890 руб.    |
| Годовая подписка (6 экз.) для физ. лиц | 4 050 руб.  |
| Годовая подписка (6 экз.) для юр. лиц  | 12 000 руб. |

### Журнал «LIGHT & ENGINEERING»

| Печатная версия                        |                |
|--|----------------|
| Журнал                                 | 40 долл. США*  |
| Годовая подписка (6 экз.)              | 210 долл. США* |
| Электронная версия                     |                |
| Статья                                 | 6 долл. США*   |
| Журнал                                 | 35 долл. США*  |
| Годовая подписка (6 экз.) для физ. лиц | 180 долл. США* |
| Годовая подписка (6 экз.) для юр. лиц  | 240 долл. США* |

\*Примечание: по курсу ЦБ на дату оплаты.

По согласованию с редакцией для юридических лиц доступна подписка на 6 месяцев (3 журнала)

### Журнал «СВЕТОТЕХНИКА» ДЛЯ ДЕТЕЙ И ИХ РОДИТЕЛЕЙ (периодичность издания 3 раза в год)

|  |            |
|--|------------|
| Журнал печатная версия                 | 690 руб.   |
| Журнал электронная версия для физ. лиц | 300 руб.   |
| Журнал электронная версия для юр. лиц  | 1 250 руб. |

ISSN 0039-7067



9 770039 706006 >

Адрес редакции: 129626, г. Москва, Проспект Мира, д. 106, офис 346  
Тел. (495) 682-58-46, 682-19-04; E-mail: [bulgakova@l-e-journal.com](mailto:bulgakova@l-e-journal.com)