

СВЕТО ТЕХНИКА

4 · 2020



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



(495) 785-37-40



**Создаем уникальные решения
для качественного освещения**



ООО «Светосервис - Кубань»
350000, г. Краснодар, ул.
Северная, 324М



svetoservis_k@mail.ru
svetoservis.ru



+7 (861) 274-98-93

НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ

Основан в 1932 году профессорами М.А. Шателеном и Л.Д. Белькиным 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. Быстрянцева, к. арх., Университет ИТМО, С.-Петербург
Л.П. Варфоломеев, к.т.н., Москва
Н. Василев (*Nicolay Vasilev*), Sofia Technical University, Болгария
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. Шахпарунянц, 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

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
С.Г. Ашурков; ashurkov@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 Sehirlili*), университет Кастамону;
 – Ренгин Юнвер (*Rengin Unver*), Технический 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 15.07.20. Подписано в печать 07.08.20
 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 4·2020

В НОМЕРЕ

ИЮЛЬ • АВГУСТ

Колонка главного редактора.....	4	Чибук М. Снижение энергопотребления в беспроводных сенсорных сетях дорожного освещения.....	71
Бизнес и инновации	10, 16, 59, 88	Раул Д., Гхош К. Термический анализ радиаторов и кристаллов мощных светодиодных модулей при разных материалах теплового интерфейса.....	80
Соловьёв А.К. Современные подходы к нормированию естественного освещения жилых зданий. Результаты исследований.....	5	ХРОНИКА	
Спиридонов А.В., Умнякова Н.П. Рекомендации по реставрации исторических светопрозрачных покрытий ГМИИ им. А.С. Пушкина.....	11	Памяти Е.И. Розовского.....	89
Карпенко В.Е. Методика обучения световому дизайну по направлению «Дизайн архитектурной среды».....	17	А.Э. Юновичу – 90 лет	90
Хуан Ч., Лю Ц., Лю И., Пойнтер М., Бодроги П., Кхан Т.К., Лю А. Зависимость цветовых предпочтений от пола: предварительное исследование.....	23	Журналу «Электричество» – 140 лет	93
Бодроги П., Го С., Кхан Т.К. Светлота в условиях дневного зрения: психофизическое моделирование посредством сигналов синечувствительных фоторецепторов сетчатки.....	32	Готовится к выходу книга «Утилитарное наружное освещение».....	54
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.....	45	НОВОСТИ МКО	
Просовский О.Ф., Буднев А.Ю., Денисов Д.Г., Барышников Н.В., Просовский Ю.О. Современная система прямого оптического широкополосного контроля толщины напыляемых оптических покрытий.....	51	Семинар МКО по фотометрии и колориметрии.....	88
Будак В.П., Ефременко Д.С., Смирнов П.А. Описание дифракции Фраунгофера в приближении теории светового поля.....	55	СПРАВОЧНАЯ ИНФОРМАЦИЯ	
Рожкова Т.А., Сысоева Е.А. Новые правила доступа светотехнической продукции на рынок ЕАЭС: соответствие четырём техническим регламентам.....	60	Международные выставки и конференции в 2020 г. (IV квартал).....	50
Капитонов С.С., Винокуров А.С., Прытков С.В., Григорович С.Ю., Капитонова А.В., Гуцин Д.В., Медведев С.А., Вильгельм Д.В. Влияние электрического режима работы светильников со светодиодами на изменение их коррелированной цветовой температуры в процессе эксплуатации.....	66	ИНФОРМАЦИОННЫЕ МАТЕРИАЛЫ	
		Светосервис-Кубань: уникальные решения для освещения.....	1
		Светосервис-СПб: светотехнические проекты любого уровня сложности.....	31
		Светлые решения для умного города от МСК БЛ Групп.....	64
		Работы по световому дизайну, выполненные студентами Дальневосточного федерального университета.....	1 с. обл.
		Oroga Engineering: качество, надёжность, оперативность.....	2 с. обл.
		Управление светом – залог безопасности.....	3 с. обл.
		Стоимость подписки на журнал «Светотехника».....	4 с. обл.

Уважаемые читатели!



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

Общей проблемой, стоящей как перед – не побоимся этого слова – человечеством, так и светотехнической отраслью сегодня, несомненно, является преодоление кризиса, вызванного пандемией коронавируса в первой половине 2020. Выход из кризиса обычно подразумевает не только восстановление прежнего уровня, но и разрешение накопившихся проблем, всегда являющихся обратной стороной развития. Поэтому важно видеть не только сегодняшние трудности, но и будущие перспективы.

Восстановление светотехники – это задача прежде всего светотехнических компаний при поддержке государственных органов, но выработка контуров будущего отрасли должна лечь на научное сообщество и, прежде всего, университеты. Очень существенно, что в светотехнической отрасли усилила всех ведущих предприятий – как производственных компаний, так и научных и образовательных организаций – объединяет отраслевой НТС, что открывает хорошие перспективы для согласованных, тщательно продуманных и взвешенных действий, предоставляя нам поистине неограниченные возможности для решения любых отраслевых проблем.

Несомненно, светотехнику будущего создавать специалистам нового типа. Кто такой светотехник сегодняшнего, а ещё важнее завтрашнего дня? Светотехника наших дней – это сложное наукоёмкое производство. Здесь нужны и специалисты классического профиля, и схемотехники, программисты, конструкторы, технологи, многие другие специалисты. Готовить одного специалиста, одновременно обладающего всеми этими знаниями и умениями, так же невозможно, как невозможно готовить всех специалистов в рамках одной вузовской кафедры.

Переход в России на Болонскую систему образования с разделением обучения, нацеленный на обновление подходов к подготовке кадров, был сделан во многом формально, и образование, по сути, осталось «советским», с той только разницей, что после 4 курса стали вручать диплом бакалавра, а подавляющая масса студентов продолжает

обучение до магистра, который остаётся «советским инженером». И дело вовсе не в том, что советский инженер плох, просто он выполнил свои задачи в эпоху индустриализации, где было главным разворачивание заводов-гигантов, часто связанное с освоением заграничного оборудования. При этом не было разницы в подготовке специалистов для работы в управлении или на производстве, в торговом секторе или в НИИ...

Основой нашей системы образования по-прежнему являются лекции, которые представляют собой наименее эффективный способ обучения. Несомненно, в 1930-е гг., когда учебников и высококвалифицированных преподавателей не хватало, лекции были жизненно необходимы. Сейчас же, в эпоху второй цифровой революции и широкой доступности посредством интернета всех возможных источников информации, единственной задачей лектора является определение наказания студентам, не посещающим его лекции. Не хочу полностью отрицать лекции, но они должны быть только по новым, опубликованным ещё только в научной литературе разделам, или носить обобщающий, мировоззренческий характер, определяющий сущность специалиста конкретного направления.

Весь мир давно перешёл на проблемно-модульное образование, когда вся программа образования разбивается на модули (блоки), в рамках которых студенты выполняют реальные проекты, а все необходимые для их выполнения сведения преподаватель даёт им в виде кратких лекций, семинаров, литературы. При таком подходе бакалавры получают специалистами, готовыми как выполнять стандартные задачи, так и обладающие творческой способностью понять и предложить решение новых задач. Такие бакалавры являются по сути советскими техниками, которые были и останутся самыми востребованными на производстве.

Магистр должен быть «штучным» специалистом, готовым не работать на производстве, а быть разработчиком новых приборов и технологий. Его главное свойство – креативность, основанная на фундаментальной подготовке по специальности. Главным инструментом подготовки такого специалиста должна быть реальная работа в КБ или научной лаборатории.

В этом смысле теряют своё значения современные кафедры с жёсткой административной и образовательной структурой. Основой должен стать институт (факультет), а кафедрами в современном звуча-

нии должны стать научные коллективы под руководством ведущего специалиста направления.

Тут возникает острый вопрос – где взять преподавателей и учебно-методическую литературу для обучения по новой форме и новым направлениям? Представляется, что в настоящий момент необходимо отбирать и готовить преподавателей по этим направлениям из числа магистров и аспирантов. Они же со своими преподавателями должны написать и новые учебники. Несомненно, это процесс итерационный, но, раз запущенный, он будет развиваться на своей основе. Заметим, так, по сути, и сформировалось в 30-е годы прошлого века знаменитое советское инженерное образование.

Как никогда в критические моменты возрастает роль научного журнала, как площадки для обсуждений, дискуссий и публикации статей по новейшим направлениям науки. Наш журнал за последние годы стал подлинно научным журналом, публикации которого опережают запросы отрасли и определяют перспективы её развития.

Сегодня наш журнал занимает 7 место по России в рейтинге лучших журналов в области электроники и электротехники, цитируется в среднем каждая вторая опубликованная нами статья. Несомненно, достижения наши могли бы быть и выше, но журнал наш является отражением практически полного отсутствия научных школ по светотехнике в стране. Здесь те же проблемы, что и в образовании – преимущественно пожилой состав, отсутствие научно-исследовательских тем и, как следствие, слабая заинтересованность аспирантов в написании диссертаций.

Представляется, что НТС, как орган, объединяющий все ведущие предприятия отрасли, мог бы сыграть решающую роль в решении описанных выше проблемы, сформировав гранты по реальным задачам отрасли. Направлений, требующих изучения и освоения, немало: это качество освещения, облучательная техника в сельском хозяйстве и медицине, УФ дезинфекция воздуха и воды, светодизайн. Может быть очень важным направлением применения цифровых технологий в светотехнике, особенно нейро-сетевых алгоритмов, искусственного интеллекта...

Только деятельное и решительное участие НТС, всех его участников вместе, сможет наполнить живым смыслом аспирантуру и магистратуру, позволит восстановить и вдохнёт новую жизнь в научные школы.

Современные подходы к нормированию естественного освещения жилых зданий. Результаты исследований

А.К. СОЛОВЬЁВ

НИУ МГСУ, Москва
E-mail: agpz@mgsu.ru

Аннотация

В помещениях жилых зданий практически не предъявляется требований к условиям зрительной работы. Световая среда оценивается по критерию насыщенности помещений естественным светом. Здесь также большое значение имеет требуемое время использования естественного света и обеспечение естественного освещения в пространстве. Задача для жилых зданий – связать эти критерии для создания комплексного метода нормирования естественного освещения в таких помещениях. В статье рассматриваются современные подходы к нормированию естественного освещения – от традиционного, с помощью КЕО, до новейших разработок, связанных с динамической оценкой естественного освещения во времени и пространстве (при обязательном учёте реального среднестатистического состояния небосвода, характерного для данной местности). Анализируются оценка метода КЕО и его энергетические показатели и даётся сравнение с нормами ФРГ. Приводятся результаты исследований в МГСУ по оценке естественного освещения с помощью пространственно-критерия светового поля – цилиндрической освещённости, которая наилучшим образом характеризует насыщенность светом помещения. Отмечается, что естественная освещённость в полном объёме не требуется на всей площади жилой комнаты в течение всего светового дня. При этом можно найти связь КЕО с коэффициентом естественной цилиндрической освещённости (КЕЦО). Это обеспечивает связь традиционного нормирования с нормированием по насыщенности помещений естественным светом. Окончательная оценка нормируемых параметров естественного освещения в жилых помещениях производится с использованием методов психофизики (для связи основных и второстепенных факторов, влияющих на комфорт световой среды).

Ключевые слова: естественное освещение, световая среда, зрительная работа, насыщенность светом помещений, нормирование естественного освещения, цилиндрическая освещённость, световой климат, энергетическая эффективность, статическое нормирование, динамическое нормирование, психофизическая оценка.

Введение

XX век явился периодом становления и расцвета науки о естественном освещении зданий. Все разработки этого времени представляли собой попытку как можно точнее определять условия естественного освещения в помещениях. Были созданы методы расчёта коэффициентов естественной освещённости (КЕО) [1–3], которые с некоторой степенью точности позволяли определять эти условия. Для того, чтобы результаты расчёта могли сравниваться

друг с другом, пришлось принять основное допущение об условиях облачности, которая является самой нестабильной и неопределённой характеристикой. В качестве основного допущения МКО приняла пасмурный небосвод за наихудшее условие для естественного освещения. При этом условии стали сравниваться значения КЕО в помещениях разного назначения с нормами. Относительные величины – КЕО были включены в нормы. Однако эти нормы базировались на требуемых условиях зрительной работы при искусственном освещении. Эти условия определялись методами психофизики по скорости и точности различения наблюдателями условных объектов (кольца Ландольдта) и по утомляемости наблюдателей во времени. В жилых зданиях задачи зрительной работы трудно определимы, поэтому для жилых комнат нормируемый уровень общей искусственной освещённости составляет 150 лк, причём в примечаниях сказано, что это рекомендуемое значение. Нормы естественного освещения были получены из условия равенства количества освещения при искусственном освещении за год и количества естественного освещения за год, получаемого суммированием «интегралов» средних часовых значений наружной естественной освещённости для каждого месяца в течение светового дня в том районе, где расположено рассматриваемое здание, и умножением на количество дней в месяце. Отношение первого значения ко второму в процентах составляет значение среднего КЕО. Среднее КЕО следует отличать от КЕО в центре помещения. Оно примерно в 1,5 раза больше. Например, для Москвы при нормируемой освещённости по условиям зрительной работы, равной 150 лк, при односменной работе в течение 8 ч и 226 рабочих днях в году количество искусственного освещения за год $A_{иск} = 150 \times 8 \times 226 = 271200$ лк·ч/год.

При начале работы в 9 ч 00 мин и окончании работы в 18 ч 00 мин (1 ч обеденного перерыва) количество естественного освещения под открытым небом составит сумму интегралов функций изменения суммарной естественной освещённости для Москвы (согласно данным СП 367.1325800.2017 «Здания жилые и общественные. Правила проектирования естественного и совмещённого освещения»). Эта сумма составит 36160000 лк·ч/год. Среднее значение КЕО составит $(271200 / 36160000) \cdot 100 = 0,75 \%$, а значение КЕО в центре комнаты – $0,75/1,5 = 0,5 \%$. Это значение определено по существующей системе нормирования естественного освещения в РФ. Но является ли оно удовлетворяющим условию комфорта внутренней световой среды по насыщенности светом помещений? Это было подвергнуто сомнению в статье аспиранта кафедры «Проектирование зданий и сооружений» НИУ МГСУ Н.А. Муравьёвой [4]. Её исследования базировались на работе М.М. Епанешникова и Т.А. Сидоровой [5], по искусственному освещению станций метрополитена. Было по-

казано, что наилучшей характеристикой, определяющей насыщенность светом помещений, является пространственная характеристика светового поля – цилиндрическая освещённость. При этом насыщенность светом перонных залов метро оказалась для наблюдателей приемлемой уже при 200 лк цилиндрической освещённости.

Связь КЕО с пространственной характеристикой светового поля – цилиндрической освещённостью

Как же связать традиционную плоскостную характеристику светового поля – КЕО с величиной, характеризующей цилиндрическую освещённость – коэффициентом естественной цилиндрической освещённости (КЕЦО). Последний представляет собой отношение внутренней цилиндрической освещённости $E_{ц}$ к одновременной наружной горизонтальной освещённости $E_{н}$, взятое в %. Брать в качестве КЕЦО отношение внутренней и наружной цилиндрических освещённостей смысла не имеет, так как все данные о световом климате во всём мире привязаны к $E_{н}$, а данных о наружной естественной цилиндрической освещённости просто не существует. В то же время $E_{н}$ хорошо характеризует изменение и уровень естественного освещения [6].

В НИУ МГСУ под руководством автора были проведены экспериментальные исследования, которые показали, что в помещениях с обычными окнами с подоконником на высоте 1 м от пола графики КЕО и КЕЦО пересекаются почти точно в центре характерного разреза помещения (КЕО на уровне рабочей поверхности и КЕЦО на уровне глаз наблюдателя, на высоте 1,5 м от пола) [4] при любых параметрах помещений. Таким образом, эти исследования показали, как можно соединить существующую систему нормирования с нормированием по насыщенности помещения светом. Предварительные исследования в жилых помещениях показали, что наблюдатели считают приемлемой насыщенность помещения светом при цилиндрической освещённости 120 лк. Следовательно, в центре помещения это значение соответствует горизонтальной освещённости 120 лк. Если перейти к КЕО, то при искусственной освещённости 120 лк по 8 ч в сутки при 30 сутках в месяце годовое количество искусственного освещения составит $120 \cdot 8 \cdot 12 \cdot 30 = 345600$ лк·ч/год. Значение нормируемого КЕО в центре жилого помещения на уровне рабочей поверхности составит $(345600/36160000) \cdot 100 \approx 1,0$ %. Если сравнивать полученное значение с нормами ФРГ (DIN5034–1, приложение А.1), то там указано, что в помещениях для длительного пребывания людей с окнами для «достаточной светлоты» значение КЕО в половине глубины помещения на высоте 0,85 м над полом и на расстоянии 1 м от боковых стен должно составлять не менее 0,9 % в середине между этими точками и не менее 0,75 % в каждой из них. Таким образом, полученное значение примерно согласуется с нормами ФРГ, и этому получено экспериментальное обоснование. Конечно, оно ещё требует до проверки дополнительными психофизическими исследованиями, однако принципы нормирования, изложенные в статье, использоваться могут.

Следует отметить, что в научной литературе отсутствует какое-либо обоснование для жилых зданий как норм ФРГ, так и норм РФ, которые требуют в одной из комнат одно-, двух- и трёхкомнатных квартир и в двух комнатах

четырёх- и более комнатных квартир КЕО на уровне 0,5 %, на расстоянии 1 м от стены, противоположной окнам, на полу; а в остальных комнатах такой же КЕО должен быть в центре помещений.

Учёт реального светового климата местности при нормировании естественной освещённости

В обзоре [5] показано, что есть два пути стандартизации естественного освещения: по простому, «статическому», критерию КЕО при небосводе, полностью закрытом облаками; на основе «динамического» критерия «автономность естественного света», связанного с абсолютными значениями естественной освещённости. Этот путь в настоящее время активно внедряется Британским институтом строительных исследований по оценке среды (BREEM). Согласно ему, естественное освещение помещений должно удовлетворять двум следующим условиям:

- минимальное значение среднего КЕО должно обеспечиваться на высоте условной рабочей поверхности на 80 % площади помещения;
- естественная освещённость должна не менее 2650 ч в год составлять 200 лк в среднем или 60 лк в наихудших местах помещения с точки зрения освещения.

Среднее значение КЕО в обычных помещениях зависит от широты местности, изменяясь от 1,5 % для широт ниже 40° и до 2,2 % для широт выше 60°. Для жилых зданий такие нормативы не приводятся.

Мы видим, что, применяя нормирование по динамическому критерию «автономии естественного света» мы учитываем изменение естественной освещённости по месяцам и в течение дня. Это можно рассматривать как более высокую ступень нормирования, для которой, однако, необходимы данные о световом климате местности в динамике по месяцам года и по времени дня. Конечно, простой «статический» критерий использовать проще, учитывая световой климат введением светоклиматических коэффициентов в расчётную формулу. Но обеспечиваемая этим точность невелика. Вообще же понятие КЕО универсально; глаз человека не оценивает абсолютные освещённости, а только относительные в сравнении с освещённостью чего-либо. В данном случае это $E_{н}$. Поэтому отказываться от относительных величин при оценке естественного освещения нельзя, и КЕО или КЕЦО (или другие относительные пространственные характеристики светового поля, отнесённые к $E_{н}$) являются полноценными оценочными характеристиками естественного освещения, которыми мы будем оперировать и в будущем. Связать статический и динамический критерии оценки естественного света – важная задача для специалистов по естественному освещению. И в первую очередь это касается светового климата местности. Световой климат зависит от многих факторов: 1) широта местности и, в связи с этим, высота подъёма солнца над горизонтом; 2) продолжительность светового дня; 3) статистика облачности и её преобладающие виды. В статье С. Дарулы и Р. Китлера [6] предложено классифицировать 15 типов небосвода по распределению яркости – от ясного до пасмурного, полностью покрытого 10-балльной облачностью. При этом КЕО, как постоянная величина для данной точки помещения, имеет смысл только при пасмурном небосводе с распределением яркости

МКО по закону П. Муна и Д. Спенсер и при равном уровне небесной своды, которое тоже иногда встречается в статистическом плане, особенно в случае систем верхнего естественного освещения. Во всех остальных случаях КЕО зависит от положения солнца на небосводе, так как вокруг солнца образуется ореол повышенной яркости, который влияет на КЕО. Этот ореол в течение дня перемещается относительно ориентации окна. Поэтому необходимо выбирать такое положение солнца относительно ориентации окна, которое подходит для цели расчёта КЕО (например, для сравнения естественного освещения в разных помещениях или определения затрат энергии на устройство естественного освещения).

Определение типа небосвода по С. Даруле и Р. Киттлеру достаточно сложно. Для этого не всегда хватает данных по световому климату в той или иной местности. В НИУ МГСУ разработана другая возможность определять распределение яркости реального небосвода – по соотношению суммарной и диффузной горизонтальных освещённости по часам дня (например, 15-го числа каждого месяца). При отсутствии данных об освещённости можно использовать данные о суммарной и диффузной солнечной радиации, которые имеются на многочисленных актинометрических станциях, имеющихся во всех городах России. Построить графики часового хода E_n для любого города можно посредством светового эквивалента солнечной радиации [7–9]. Подобным образом в НИУ МГСУ получены графики хода E_n при реальном среднестатистическом небе для городов Вьетнама.

Определение площади светопроёмов как упрощение для проектировщиков естественного освещения

До конца первой половины XX века одним из способов нормирования естественного освещения было нормативное определение отношения площади окон в помещении к площади пола. Теперь это называется «проёмностью помещения». Данный способ прост и удобен для проектировщиков, но не является точным. После того нормы усложнились, вводились новые показатели, основным из которых был КЕО. Несмотря на это, попытки упрощать расчёты и проектирование не прекращались. Наиболее просто это можно представить характеристикой, выраженной через отношение площади окон к площади пола. В СНиП П-4.79 «Естественное и искусственное освещение» и в последующих сводах правил рекомендовалось проектирование систем естественного освещения вести в две стадии. Первая стадия предполагала приближённое определение площади светопроёмов, которое основывалось на формулах для бокового и для верхнего естественного освещения:

$$100 \cdot \frac{S_o}{S_n} = \frac{e_{\text{норм}} \cdot \eta_o}{\tau_o \cdot r_o} \cdot K_{\text{зд}} \cdot K_3, \quad (1)$$

$$100 \cdot \frac{S_\phi}{S_n} = \frac{e_{\text{норм}} \cdot K_3 \cdot \eta_\phi}{\tau_o \cdot r_2 \cdot K_\phi}. \quad (2)$$

Здесь S_o , S_ϕ и S_n – площади окон, фонарей и пола, $e_{\text{норм}}$ – нормируемый КЕО, τ_o – общий коэффициент светопропу-

скания проёмов, r_o и r_2 – коэффициенты, учитывающие влияние отражённого света от внутренних поверхностей помещения в расчётной точке при боковом и при верхнем естественном освещении, $K_{\text{зд}}$ – коэффициент, учитывающий затенение окон противостоящими зданиями, K_3 – коэффициент запаса, учитывающий загрязнение проёмов, K_ϕ – коэффициент, учитывающий тип фонаря, η_o – световая характеристика окна, показывающая отношение S_o к S_n в %, обеспечивающее значение КЕО в 1 % в расчётной точке в глубине помещения на условной рабочей поверхности, η_ϕ – световая характеристика фонаря.

Для наиболее распространённых геометрических и светотехнических параметров боковых и верхних светопроёмов в позднейшем своде правил СП 23–102–2003 приведены графики для определения относительной площади светопроёмов, несколько упрощающие расчёт по формулам (1) и (2). Если рассматривать эти графики, то можно отметить, что для светопроёмов верхнего света имеет место прямая пропорциональность между значениями КЕО и проёмности (т.е. отношения S_o/S_n). Для светопроёмов бокового естественного освещения графики построены по другому принципу: здесь (как показано на рис. 1) проёмность S_o/S_n зависит от отношения глубины помещения d_n к высоте верха окна над рабочей плоскостью h_o . При этом затенение противостоящими зданиями отсутствует. Графики представлены серией кривых. Если представить зависимости КЕО от проёмности, то они также будут выражать прямую пропорциональность между этими величинами. Для этого необходимо просто выбрать характерные соотношения глубины помещения с высотой до верха окна и построить серию графиков. На рис. 2 такие графики, построенные в МГСУ, показаны в качестве примера для характерных параметров рабочих комнат.

Для нормирования естественного освещения, возможно, следует вернуться к определению «проёмности» помещений, но уже на более высоком уровне, повышающем точность и наиболее удобном для проектировщиков.

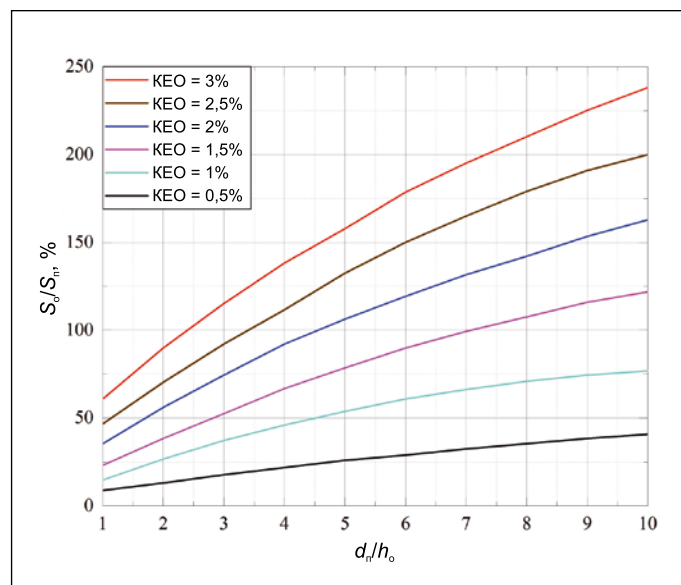


Рис. 1. Зависимость проёмности S_o/S_n от отношения глубины помещения d_n к высоте верха окна от рабочей плоскости h_o

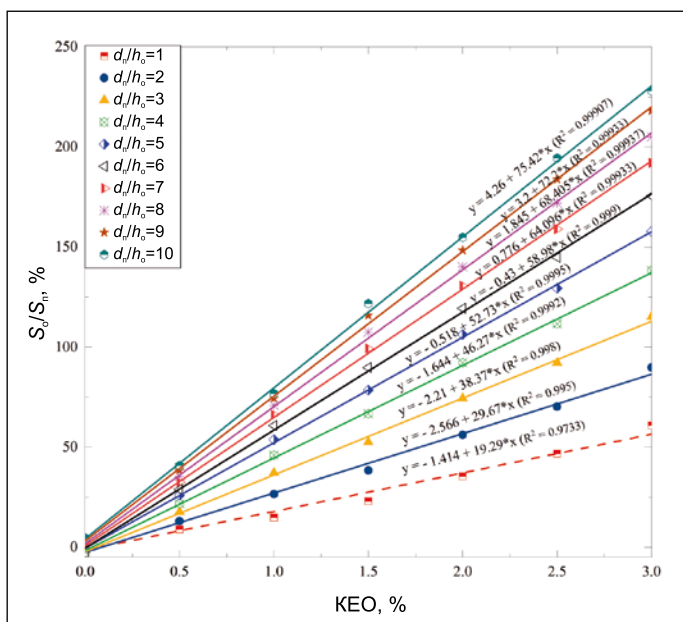


Рис. 2. Зависимость проёмности S_0/S_n от КЕО

Энергоэффективность оконных проёмов

Площадь окон тесно связана с уровнем энергозатрат на устройство светопроёмов в здании. Чем больше светопроём, тем меньше затраты электроэнергии на искусственное освещение. Это подтверждается вышесказанным о том, что КЕО пропорционален отношению S_0/S_n (т.е. проёмности). Но чем больше площадь окон, тем больше теплопотери через них зимой, так как сопротивление теплопередаче хороших окон примерно втрое меньше сопротивления теплопередаче глухих частей стен. Конечно, сопротивление теплопередаче у современных окон теоретически может достигать значений практически как у стен, но по соображениям экономии энергии это пока невозможно.

Летом, чем больше площадь окон, тем больше теплопоступление в помещения через окна южной, западной и юго-восточной ориентаций. Через окна восточной ориентации в помещение проходит меньше тепла, так как солнце ещё не успевает прогреть воздух после ночи. Однако солнечная тепловая радиация и в этом случае должна учитываться в тепловом балансе помещения. Через северные светопроёмы идут в основном лишь теплопотери и естественное освещение помещений. Поэтому с северной стороны следует располагать помещения с пониженными требованиями к естественному освещению и, соответственно, уменьшать размеры оконных проёмов.

Таким образом, затраты энергии на электрическое освещение, отопление, вентиляцию и охлаждение летом должны быть минимальны. Для этого необходимо находить соответствующую площадь светопроёмов. Эта площадь может быть разной в зависимости от климатических условий места строительства. Такая оптимальная с энергетической точки зрения площадь остекления должна быть сопоставлена с необходимой площадью окон по условиям освещения с учётом насыщенности помещения естественным светом, условий зрительной работы, необходимого времени её обеспечения и необходимой площади помещения, в котором она должна обеспечиваться в это время.

Методика определения энергетических затрат на устройство светопроёмов была разработана ещё в 1985 г. в НИИСФ [10] и представляется весьма надёжной, но в настоящее время она незначительно изменена нами в связи с появлением новых кондиционеров воздуха и несколько упрощена [11]. Нами также была разработана компьютерная программа «ECON», с помощью которой определены энергоэффективные размеры зенитных фонарей в климатических условиях г. Архангельск. Надеюсь, что ниже следующее подробное изложение этой методики будет интересно проектировщикам.

Суммарные затраты энергии должны рассчитываться с переводом в затраты условного топлива, так как на производство тепловой энергии и электрической энергии требуются разные затраты. Поэтому их следует рассчитывать по формуле

$$\omega_{\text{усл}} = A_1 \cdot \omega_{\text{т.от}} + A_2 \cdot (\omega_{\text{э.от}} + \omega_{\text{э.в}} + \omega_{\text{э.х}} + \omega_{\text{э.и}}),$$

где $A_1 = 41,2$ кг/ГДж и $A_2 = 0,33$ кг/(кВт·ч) – удельный расход условного топлива на электростанциях общего использования на 1 ГДж тепловой энергии и на 1 кВт·ч электроэнергии; $\omega_{\text{т.от}}$ – затраты энергии на восполнение теплопотерь через светопроёмы, ГДж/м²/год; $\omega_{\text{э.от}}$ – удельный годовой расход электроэнергии на отопление, принимаемый рассчитанным по формуле

$$\omega_{\text{э.от}} = 7,1 \cdot \omega_{\text{т.от}}$$

для систем воздушного отопления и равным нулю для других систем отопления; $\omega_{\text{э.в}}$ – удельное количество электроэнергии на вентиляцию, кВт·ч/м²; $\omega_{\text{э.х}}$ – удельные энергозатраты в год на охлаждение приточного воздуха кВт·ч/м²; $\omega_{\text{э.и}}$ – удельные энергозатраты на искусственное освещение в год, кВт·ч/м². Определение затрат энергии на отопление, вентиляцию, охлаждение и искусственное освещение производится по формулам из пособия [10]. Значения $\omega_{\text{т.от}}$ определяются по формуле

$$\omega_{\text{т.от}} = 10^{-6} \cdot 1,1 \cdot 3,6 \cdot (1,3 + \eta) \cdot \left(\frac{1}{R_{\text{ск}}} - \frac{1}{R} \right) \times \\ \times (t - t_{\text{от}}) \cdot Z_{\text{от}} \cdot 24 \cdot \frac{S_{\text{ск}}}{S_{\text{п}}}$$

Здесь 1,1 – коэффициент, учитывающий бесполезные потери тепла в системе отопления; 3,6 – коэффициент пересчёта единиц кДж/(Вт·ч); 1,3 – коэффициент, учитывающий потери тепла на нагревание наружного воздуха, поступающего через светопроёмы путём инфильтрации (этот коэффициент при высокой герметизации проёмов может приближаться к 1,0); η – коэффициент, учитывающий добавочные потери тепла (его значение следует принимать по СНиП «Отопление и вентиляция»); $R_{\text{ск}}$ и R – сопротивления теплопередаче светопрозрачной конструкции и стены «по глади»; t и $t_{\text{от}}$ – расчётные температуры внутреннего воздуха и отопительного периода; $Z_{\text{от}}$ – продолжительность отопительного периода, сут.; 24 – количество часов в сутках; $S_{\text{ск}}$ и $S_{\text{п}}$ – площади светопроёмов и пола в помещении, м².

Затраты электрической энергии на охлаждение с помощью кондиционеров (при их наличии в доме) определяются по формуле

$$\omega_{\text{э.х}} = 10^{-3} \cdot (1,3 + \eta) \cdot \left(\frac{1}{R_{\text{ск}}} - \frac{1}{R} \right) \times \\ \times (t_{\text{ср.охл}} - t_{\text{х}}) \cdot T_{28} \cdot \frac{S_{\text{ск}}}{S_{\text{п}}} + 0,72 \cdot L_0 \cdot N_{\text{а}} \cdot T_{28}.$$

Здесь $t_{\text{ср.охл}}$ – средняя температура наружного воздуха за период охлаждения, определяется по «справочнику» [12] (по таблице повторяемости температур в часах, по убывающему итогу часов с температурой выше 28 °С); $t_{\text{х}}$ – максимально допустимая температура внутреннего воздуха в период охлаждения, принимаемая из гигиенических соображений (в России такой нормируемой температуры нет, но по опыту применения бытовых кондиционеров она может быть принята равной 24 °С; T_{28} – продолжительность периода охлаждения в сутках, принимаемая по тому же «справочнику» [12]; $N_{\text{а}}$ – удельный расход электроэнергии на охлаждение, кВт·ч/м³; L_0 – производительность системы вентиляции в устройствах распределения охлажденного воздуха («фенкойлах») и вообще, в системах вентиляции, м³/ч на 1 м² площади пола, рассчитываемая как

$$L_0 = \frac{3,6 \cdot q_{\text{рад}}^{\text{макс}}}{c \cdot \rho \cdot (t_{\text{ср.охл}} - t_{\text{х}})},$$

Здесь $c = 1$ кДж/кг/°С – удельная теплоёмкость воздуха; $\rho = 1,2$ кг/м³ – плотность воздуха; $q_{\text{рад}}^{\text{макс}}$ – радиационные поступления в помещение, Вт/м², наибольшее значение которых определяется максимальным значением суммарной солнечной радиации, падающей на плоскость светопрёма данной ориентации в течение суток и которые рассчитываются по формуле

$$q_{\text{рад}}^{\text{макс}} = Q_{\text{В}}^{\text{макс}} \cdot \tau_{\text{с}} \cdot \tau_2 \cdot MF \cdot \beta_{\text{сз}} \cdot \frac{S_{\text{ск}}}{S_{\text{п}}}.$$

Где $Q_{\text{В}}^{\text{макс}}$ – максимальное значение солнечной радиации, приходящей в данной местности на вертикальную поверхность самой неблагоприятной – западной – ориентации в июле; $\tau_{\text{с}}$ – коэффициент теплопропускания окон; τ_2 – коэффициент светопропускания, зависящий от вида переплётов (для однокамерных стеклопакетов в пластмассовых переплётах $\tau_2 = 0,69$, а для двукамерных – 0,57), MF – коэффициент эксплуатации, учитывающий загрязнение; $\beta_{\text{сз}}$ – коэффициент теплопропускания солнцезащитных устройств (при их наличии), отн. ед. (Коэффициенты определяются по СП 367.1325800.2017).

Затраты энергии на искусственное освещение рассчитываются по формуле

$$\omega_{\text{э.и}} = 10^{-3} \cdot E \cdot K_{\text{з.и}} \cdot Z \cdot \alpha \cdot P_{\text{л}} \cdot (1 + \beta) \cdot \frac{T_{\text{и}}}{\Phi_{\text{л}} \cdot I_{\text{св}}}.$$

Здесь E – нормируемое значение искусственной освещённости, $\Phi_{\text{л}}$ – световой поток ламп искусственного освещения, $T_{\text{и}}$ – время использования искусственного освещения, $P_{\text{л}}$ – мощность ламп, $I_{\text{св}}$ – коэффициент использования светового потока светильника [13], α – коэффициент,

учитывающий потери энергии в ПРА, β – то же в сети, Z – коэффициент, учитывающий неравномерность освещённости (принимается равным 1,15 для ламп направленного света и 1,1 для люминесцентных).

Для определения времени использования искусственного освещения можно пользоваться таблицами [10] или аналитическим методом с аппроксимацией графиков хода $E_{\text{н}}$ в зависимости от синуса высоты солнца с небольшими поправками на состояние облачности.

Таким образом, по этой методике можно определять энергетическую эффективность проёмности для данного места строительства и, если надо, корректировать размеры окон с учётом их ориентации по странам света.

Проверка нормирования естественного освещения методами психофизики

Окончательно все методы определения нормативных требований к естественному освещению жилых помещений следует проверять методом психофизики. Действительно, мы можем рассчитывать физические параметры естественного освещения в помещении и определять требования к уровням естественной освещённости по условиям некоторой зрительной работы с определением нормированных значений КЕО, но только потребность жителей, определённая методом психофизики, даёт нам окончательный ответ.

В МГСУ психофизическими исследованиями занимались ещё в конце XX века применительно к вопросам движения людских потоков и к вопросам использования пространственных характеристик светового поля для улучшения условий зрительной работы с объёмными и рельефными объектами различения. Эти исследования проводились совместно с существовавшей в то время лабораторией психофизики МГУ по разработанным в этой лаборатории методикам применительно к нашим задачам. В настоящее время при проведении исследований мы используем работы американского учёного Х. Хелсона [14], в которых он предлагает рассматривать любые вопросы по ощущению и восприятию, связанные с субъективной оценкой наблюдателями, как сумму основного, второстепенного и фонового факторов, возведённых в степени, показатели которых (весовые коэффициенты) указывают значимость этих факторов при оценке. Расчётная формула Х. Хелсона такова: $A = X^p \cdot B^q \cdot R^r$. Здесь X – основной фактор; если это освещённость, то только необходимая для обеспечения основной задачи. В помещениях, где основным является зрительная работа, это нормируемая искусственная освещённость, а где основные требования предъявляются к насыщенности помещения естественным светом, это цилиндрическая освещённость, определяемая в НИУ МГСУ по результатам психофизических исследований [15]. Для жилых помещений основным фактором служит именно этот фактор, а нормируемая искусственная освещённость – фактор второстепенный (B). Фоновый же фактор R для жилых помещений может вообще отсутствовать. Значения весовых коэффициентов p , q и r могут зависеть от оцениваемых ситуаций. При этом, в жилых помещениях основной и фоновый факторы могут оцениваться, например, при $p = 0,7$ и $q = 0,3$ (что уточняется анализом периодов занятия жильцами разного вида активности в домашних условиях).

Заключение

В настоящей статье показаны результаты научных работ, выполненных в НИУ МГСУ и в ряде других научно-исследовательских организаций мира, которые при соответствующей доработке могут быть положены в основу нормирования естественного освещения жилых зданий. По этим результатам можно формулировать направления дальнейших исследований в области естественного освещения зданий. Для жилых зданий этими направлениями могут быть следующие.

- Определение требуемой средней освещённости (в лк), которую необходимо обеспечивать в жилой комнате в течение определённого периода светового дня в течение года. Определение доли (в %) площади помещения, на которой надо обеспечивать требуемый уровень средней освещённости в течение определённого периода светового дня в течение года.

- Определение периода года, в течение которого на данной доле площади помещения надо обеспечивать требуемую среднюю освещённость в течение светового дня.

- Определение среднего значения КЕО, которое надо обеспечивать на данной доле площади помещения. Определение проёмности помещения.

- Проверка энергетической эффективности полученной площади остекления по расходу условного топлива на отопление, охлаждение и искусственное освещение на 1 м² площади помещения.

- Корректировка проёмности по ориентации проёмов по сторонам света.

- Расчёт по формуле Хельсона требуемого значения освещённости в зависимости от требований к помещению по уровню основного фактора (например, насыщенности естественным светом помещения) и уровню второстепенного фактора (например, по условиям зрительной работы).

- Определение по этому значению нормируемого среднего значения КЕО в помещении.

Каждое из этих направлений может быть самостоятельной темой исследования, особенно, если рассматривать не только жилые здания, но и здания и помещения, где условия зрительной работы являются определяющими. В случае объёмных и рельефных объектов различного характера следует использовать такие пространственные характеристики светового поля, как средняя сферическая освещённость, средняя полусферическая освещённость, световой вектор и их соотношения [16]. Использование пространственных характеристик светового поля только за счёт собственного тенеобразования может значительно снижать затраты электроэнергии на искусственное освещение.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Гусев Н.М. Основы строительной физики: [Учебник для вузов по спец. «Архитектура»]. – М.: Стройиздат, 1975. – 440 с.
2. Гусев Н.М., Киреев Н.Н. Освещение промышленных зданий. – М.: Стройиздат, 1968. – 161 с.
3. СНиП П-А.4–79 «Естественное и искусственное освещение».
4. Муравьёва Н.А., Соловьёв А.К. Система определения требуемых параметров естественной световой среды в помещениях по критерию насыщенности естественным светом // Научное обозрение. – 2013. – № 9. – С. 132–137.

5. Дарула С. Обзор современного состояния и перспектив стандартизации в области естественного внутреннего освещения // Светотехника. – 2019. – № 1. – С. 6–20.

6. Дарула С., Кумтлер Р. Классификация естественного освещения в условиях облачности // Светотехника. – 2014. – № 5. – С. 37–45.

7. Perez R., Seals R., Michalsky J. All weather for sky luminance distribution – Preliminary configuration and validation. // Solar Energy. – 1993. – Vol. 13, No. 4. – P. 235–245.

8. Littlefair P.J. The luminance distribution of the average sky // Lighting Research and Technology. – 1998. – Vol. 13, No. 4. – P. 192–198.

9. Nakamura H., Oki M., Hayashi Y. Luminance distribution of the intermediate sky // Journal of Light and Visual Environment. – 1985. – Vol. 9, No. 1. – P. 6–13.

10. НИИСФ Госстроя СССР. Пособие по расчёту и проектированию естественного, искусственного и совмещённого освещения (к СНиП П-4–79). – М.: Стройиздат, 1985.

11. Соловьёв А.К., Жуёну Б. Выбор площади оконных проёмов жилых зданий в условиях муссонного климата Дальнего Востока РФ и северных районов КНР // Светотехника. – 2019. – № 5. – С. 49–54.

12. СНиП П-А.6–72 «Строительная климатология и геофизика». Строительные нормы и правила. Госстрой СССР. – М.: Стройиздат, 1973. (Используется как справочник.)

13. Справочная книга для проектирования электрического освещения / Под ред. Г.М. Кнорринга. – Л.: Энергия, 1976. – 384 с.

14. Helson H. Adaptation level theory. – New York: Harper & Row, 1964. – 732 p.

15. Соловьёв А.К., Стецкий С.В., Муравьёва Н.А. Комфортная световая среда при естественном и совмещённом освещении. Определение её характеристик методом субъективных экспертных оценок // Светотехника. – 2018. – № 3. – С. 32–38.

16. Solovev A.K. Die Anwendung der Lichtfeldtheorie bei der Projektierung der Beleuchtung von Arbeitstaeten // Licht. – 1996. – Nu. 5. – S. 442–446.



Соловьёв Алексей Кириллович, доктор техн. наук, профессор. Окончил в 1965 г. МИСИ им. В.В. Куйбышева. Профессор кафедры «Проектирование зданий и сооружений» НИУ МГСУ. Советник РААСН. Член Европейской академии наук и искусств и редколлегии журнала «Светотехника/Light & Engineering». Имеет звания «Почётный строитель РФ» и «Заслуженный работник высшей школы РФ»

«Лисма» расширяет линейку облучателей против коронавируса

Оперативным ответом предприятия на угрозу распространения коронавируса стала разработка бактерицидных облучателей «Aladdin-19» и «Aladdin-19 Slim», которые уничтожают 99,9 % патогенных микроорганизмов: вирусов, в том числе коронавируса, бактерий, грибов, плесени, золотистого стафилококка.

Бактерицидное действие оказывается УФ излучением; у «Aladdin-19» излучающим элементом служит лампа ДРТ-125, а у «Aladdin-19 Slim» – две лампы ДБ-8.

Оба прибора – собственная разработка «Лисмы», и сегодня именно УФ облучение – наиболее эффективный способ дезинфекции общественных мест, транспорта, больничных палат и жилых помещений, поддерживаемый Минздравом РФ. «Aladdin-19» выпускается на предприятии уже около месяца и активно продаётся по всей России, а «Aladdin-19 Slim» поступит в продажу в начале июля.

lisma.su
30.06.2020

Рекомендации по реставрации исторических светопрозрачных покрытий ГМИИ им. А.С. Пушкина

А.В. СПИРИДОНОВ, Н.П. УМНЯКОВА

Научно-исследовательский институт строительной физики РААСН, Москва
E-mail: spiridonov@aprok.org

Аннотация

В связи с активизацией работ по реставрации исторических зданий, являющихся памятниками культуры и относящихся к архитектурным памятникам, встают многочисленные вопросы о возможности повышения эффективности светопрозрачных конструкций, включая их энергетическую эффективность, с использованием современных инновационных технологий. Стоимость грамотной реконструкции окон и фонарей с сохранением исторических элементов значительно выше стоимости стандартных современных конструкций, вследствие чего известны многочисленные примеры варварской непропорциональной замены исторических окон на современные. Это не только портит внешний вид зданий, но и противоречит федеральным законам (со всеми вытекающими последствиями).

Ключевые слова: реставрация старых зданий, исторические светопрозрачные покрытия, компьютерное моделирование, сопротивление теплопередаче, конденсат, фонарь, подфонарник, рекомендации, светопрозрачные конструкции, энергетическая эффективность, параметры микроклимата, экспозиционные помещения музея.

Ранее сотрудниками НИИСФ РААСН были проведены многофакторные натурные обследования исторических светопрозрачных покрытий памятника культуры федерального значения – главного здания ГМИИ им. А.С. Пушкина, на основе которых было установлено их несоответствие современным требованиям к таким конструкциям. По техническому заданию и проекту реконструкции здания было предложено 13 вариантов возможной реставрации указанных покрытий. Для оценки предложенных вариантов были проведены

комплексное компьютерное моделирование и соответствующие расчёты в соответствии с сертифицированным программным комплексом «WINDOW TEST».

На основе проведённых обследований и компьютерных расчётов были предложены оптимальные решения по реставрации исторических светопрозрачных покрытий главного здания ГМИИ им. А.С. Пушкина, предусматривающие сохранение оригинальных элементов металлических конструкций и обеспечивающие повышение теплотехнических характеристик фонаря и подфонарника.

Введение

В последнее время активизировались – практически по всей РФ и, в большей мере, по ряду других стран – работы по сохранению зданий, относящихся к историческому и культурному наследию. (Только в Москве в одном только 2019 г. было отреставрировано 170 исторических зданий, а в 2020 г. планируется ещё большая активность в этом направлении.) Однако повысилось и количество неудачных решений, скандалов и даже судебных разбирательств, связанных с реставрацией исторических зданий, в том числе со светопрозрачными конструкциями.

Как уже отмечалось [1], больше всего проблем с необоснованной заменой исторических светопрозрачных конструкций старых зданий наблюдается в Санкт-Петербурге и Москве. Это абсолютно понятно и объяснимо – именно в этих городах наибольшее количество сохранившихся зданий, относящихся к «объектам культурного и исторического наследия», и соответственно повышенные бюджеты.

Однако примеры варварского отношения к «историческому наследию» есть не только в Москве [2–5] и Санкт-Петербурге [6–8], но и в Рязани [9],

Омске [10], Нижнем Новгороде [11], Переславле-Залесском [12] и в других бесконечно многих городах и весях необъятной РФ.

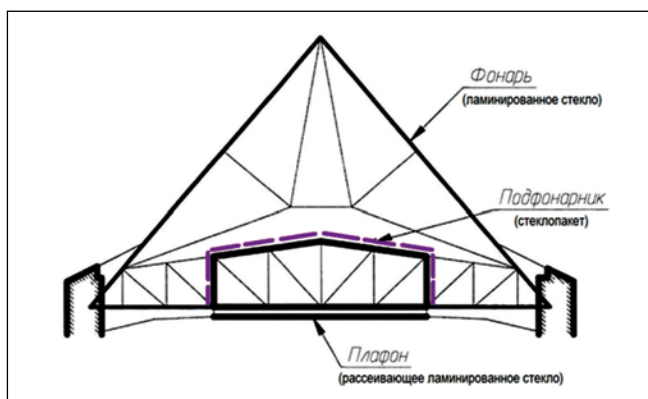
Нельзя сказать, что с подобной практикой у нас все согласны. Например, известны и судебные решения по восстановлению исторических окон [11, 13, 14], и запрет на установку решёток и кондиционеров, уродующих фасады старых зданий [15], и случаи создания специальных комиссий, призванных следить за грамотной реставрацией светопрозрачных конструкций [16, 17], и многотысячные штрафы за уродование фасадов зданий [14, 18]. Правда, бывают и анекдотические инициативы. Так, новый губернатор Санкт-Петербурга А.Д. Беглов предложил просто покрасить незаконно установленные белые окна из ПВХ-профиля в «исторический» цвет и тем самым задёшево «исправить» нарушения [19].

Справедливости ради стоит отметить и удачные реконструкции исторических светопрозрачных конструкций [20, 21], но их, к сожалению, не очень много. Актуальность темы сохранения идентичности старинных зданий в городах подчёркивает и выход в 2019 г. книги [22], подготовленной при участии известных оконных компаний *VEKA* и *SIEGENIA*. Конечно, в силу основного профессионального и коммерческого интереса этих компаний, в книге сделан упор на использование современных окон из ПВХ-профилей, а это все-таки не «чистая» реставрация, скорее – «реконструкция» или, модная сегодня, «реновация» («капитальный ремонт»). Тем не менее книга [22], безусловно, интересна и полезна.

Специалисты в области научной реставрации пытаются именно восстановить повреждённые элементы исторических зданий. Не всегда это возможно – многие окна практически утрачены (деревянные сгнили, а металлические проржавели). В этом случае рамы стараются заменять точными репликами из аналогичных материалов. К сожалению, оконных ПВХ-профилей до середины 20-го века не существовало.

Споры о возможности использования разных методов при сохранении исторических зданий ведутся давно – сторонников разных подходов практически поровну. Довольно любопытные соображения по этому поводу опубликованы в статье [23].

Рис. 1. Проект реконструкции светопрозрачных покрытий



При этом повышение энергетической эффективности светопрозрачных конструкций, изготовленных из металла в начале 20-го века и требующих сохранения основных элементов по условиям охраны памятника культуры, до современных требований с использованием современных технологий – задача уникальная и не имеющая аналогов в практике.

Метод

В результате проведённых обследований исторических светопрозрачных покрытий [24] стало очевидно, что они не соответствуют современным требованиям ни по сопротивлению теплопередаче, ни по другим показателям. При сохранении большей части металлических рам (что является требованием закона об охране памятников культурного наследия и задания Заказчика [25]) требовалось провести масштабные компьютерные расчёты для определения оптимальных вариантов реставрации покрытий.

В соответствии с планом реконструкции ГМИИ им. А.С. Пушкина предполагается – при сохранении основных исторических конструкций (автор – выдающийся инженер В.Г. Шухов) – изолировать подкрышное пространство от экспозиционных помещений и установить на подфонарике вместо стекла энергосберегающие стеклопакеты (рис. 1).

Расчёт теплотехнических характеристик исторических и предлагаемых для реконструкции светопрозрачных покрытий, а также распределения температур по внутренним поверхностям остекления и профилей металлических рам проводился в соответствии

с сертифицированным программным комплексом «WINDOW ТЕСТ»¹ для теплотехнических расчётов и расчёта теплотехнических коэффициентов светопрозрачных конструкций в составе программ «WINDOW THERM TEMPER», согласно [26], при разных граничных условиях для каждого из применяемых вариантов заполнения светопрозрачных конструкций. Более подробно методика расчёта и область её применения описаны в [27, 28].

Расчёты

Для проведения расчётов были предложены следующие варианты исполнения светопрозрачных конструкций, общую схему которых см. на рис. 1:

Фонарь:

Вариант 1 – существующая историческая конструкция остекления фонаря: стекло толщиной 4 мм, установленное в металлические тавры размером 35×35×3 мм.

Вариант 2 – в существующую историческую конструкцию (*вариант 1*) вместо стекла установлено многослойное стекло в соответствии с проведёнными прочностными расчётами [28].

Подфонарик:

Вариант 3 – существующая металлическая рама из тавра размером 35×35×3 мм, остеклённая простым стеклом толщиной 4 мм.

Вариант 4 – существующая металлическая рама (*вариант 3*), остеклённая двухкамерным стеклопакетом 4И-10Ар-4-10Ар-4И (И-стекло: «PLANITHERM 4S», коэффициент эмиссии 0,013, «тёплая» дистанционная рамка «TGI»).

Вариант 5 – существующая металлическая рама (*вариант 3*), остеклённая двухкамерным стеклопакетом 4И-10Ар-4-10Ар-4И (И-стекло: «PLANITHERM 4S», коэффициент эмиссии 0,013, «тёплая» дистанционная рамка «TGI»); со стороны подкрышного пространства на тавре есть накладка толщиной 10 мм из пенополистирола.

Вариант 6 – существующая металлическая рама (*вариант 3*), остеклённая двухкамерным стеклопакетом 4И-10Кр-4-10Кр-4И (И-стекло: «PLANITHERM 4S», коэффициент эмиссии 0,013, «тёплая» дистанционная рамка «TGI»).

Вариант 7 – существующая металлическая рама (*вариант 3*), остеклённая двухкамерным стеклопакетом 4И-10Кр-4-10Кр-4И (И-стекло: «PLANITHERM 4S», коэффициент эмиссии 0,013, «тёплая» дистанционная рамка «TGI»); со стороны подкрышного пространства на тавре есть накладка толщиной 10 мм из пенополистирола.

Остальные варианты расчёта связаны с заменой существующей металлической рамы (это было бы возможно в случае согласования замены исторической конструкции стороной реставраторов).

Вариант 8 – повторение исторической конструкции точной репликой из стеклопластика с остеклением двухкамерным стеклопакетом 4И-10Ар-4-10Ар-4И (И-стекло: «PLANITHERM 4S», коэффициент эмиссии 0,013, «тёплая» дистанционная рамка «TGI»).

Вариант 9 – повторение исторической конструкции точной репликой из стеклопластика с остеклением двухкамерным стеклопакетом 4И-10Ар-4-10Ар-4И (И-стекло: «PLANITHERM 4S», коэффициент эмиссии 0,013, «тёплая» дистанционная рамка «TGI»); со стороны подкрышного пространства на тавре есть накладка толщиной 10 мм из пенополистирола.

Вариант 10 – повторение исторической конструкции точной репликой из стеклопластика с остеклением двухкамерным стеклопакетом 4И-10Кр-4-10Кр-4И (И-стекло: «PLANITHERM 4S», коэффициент эмиссии 0,013, «тёплая» дистанционная рамка «TGI»).

Вариант 11 – повторение исторической конструкции точной репликой из стеклопластика с остек-

¹ Программный комплекс «WINDOW-ТЕСТ. Версия 2017. Теплотехнические расчёты и определение теплотехнических характеристик светопрозрачных конструкций» (сертификат RA.RU.AB86.H00994, срок действия: 01.03.2017–29.02.2020)

клением двухкамерным стеклопакетом 4И-10Кр-4-10Кр-4И (И-стекло: «PLANITHERM 4S», коэффициент эмиссии 0,013, «тёплая» дистанционная рамка «TGI»); со стороны подкрышного пространства на тавре установлена накладка толщиной 10 мм из пенополистирола.

Вариант 12 – рама – фасадная система «Raico», изготовленная по геометрии существующего подфонарника с использованием коробчатого стального профиля 50×50 мм с остеклением двухкамерным стеклопакетом 4И-10Ар-4-10Ар-4И (И-стекло: «PLANITHERM 4S», коэффициент эмиссии 0,013, «тёплая» дистанционная рамка «TGI»).

Вариант 13 – рама – фасадная система «Raico», изготовленная по геометрии существующего подфонарника с использованием коробчатого стального профиля 50×50 мм с остеклением двухкамерным стеклопакетом 4И-10Кр-4-10Кр-4И (И-стекло: «PLANITHERM 4S», коэффициент эмиссии 0,013, «тёплая» дистанционная рамка «TGI»).

Внутренние (в экспозиционных залах) микроклиматические условия для расчётов были приняты в соответствии с проектом реконструкции главного здания ГМИИ – температура внутреннего воздуха $(20 \pm 1)^\circ\text{C}$, относительная влажность воздуха $(50 \pm 5)\%$.

Расчёты по остеклению фонаря были проведены при температуре наружного воздуха минус 28°C (в соответствии с документом [29, табл. 3.1]).

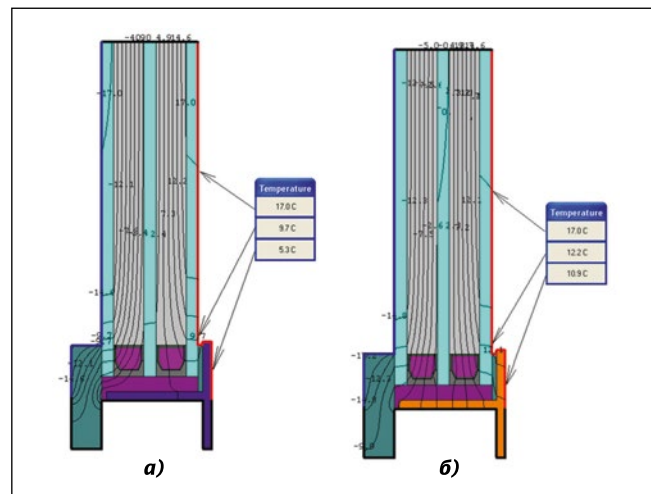
При этом температура воздуха в подкрышном пространстве по результатам обследований была принята (в отсутствие солнечного облучения) равной минус 18°C .

При расчётах теплотехнических характеристик подфонарника были приняты следующие граничные температурные условия: температура воздуха в подкрышном пространстве: минус 18°C ; температура воздуха внутри подфонарного пространства: $+21^\circ\text{C}$.

В соответствии с рекомендациями [30, 31] было принято, что коэффициенты теплоотдачи у внутренней поверхности стеклопакета, у внутренней поверхности переплётов (рам) и у наружной поверхности стеклопакета: 8,0; 8,7 и $23 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{C})$ соответственно.

Коэффициент теплопроводности некоторых материалов, принятых в расчётах, $\text{Вт}/(\text{м} \cdot ^\circ\text{C})$: 0,25 (уплотни-

Рис. 2. Распределение температур по внутренней поверхности остекления подфонарника для вариантов 7 (а) и 11 (б)



тель «EPDM»); 160 (алюминий); 58 (сталь) и 0,17 (полиуретан).

При расчётах остекления фонаря были приняты следующие условия: размеры элемента конструкции: $1300 \times 435 \text{ мм}$; размеры стекла: $1110 \times 415 \text{ мм}$; наклон к горизонту: 50° .

При расчётах остекления подфонарника были приняты следующие условия: размеры элемента конструкции: $2240 \times 890 \text{ мм}$; размеры стекла: $2200 \times 850 \text{ мм}$; наклон к горизонту: 13° .

Результаты оценки сопротивления теплопередаче, $\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{C}/\text{Вт}$, разных вариантов исполнения двух контуров (фонарь и подфонарник) светопрозрачного покрытия следующие:

Фонарь: 0,18 (вариант 1) и 0,16 (вариант 2).

Подфонарник: 0,17 (вариант 3); 0,68 (вариант 4); 0,74 (вариант 5); 0,82 (вариант 6); 0,92 (вариант 7); 0,82 (вариант 8); 0,85 (вариант 9); 1,03 (вариант 10); 1,08 (вариант 11); 0,71 (вариант 12) и 0,85 (вариант 13).

Другие результаты расчётов светопрозрачных конструкций приведены на рис. 2, для двух из вышеуказанных вариантов.

Основные выводы по результатам проведённых расчётов следующие:

- теплотехнические характеристики исторических светопрозрачных конструкций фонаря и подфонарника (варианты 1 и 3) не соответствуют действующим нормативным документам [32], в том числе и после замены остекления фонаря в соответствии с прочностными расчётами (вариант 2);

- все варианты замены стекла в подфонарнике на предложенные стеклопакеты (варианты 4–13) вроде бы соответствуют требованиям [32], однако вышеуказанные расчёты проводи-

лись для вертикального расположения конструкций. При этом для наклонной конструкции (13° к горизонту) должен быть введён понижающий коэффициент, что связано с особенностями конвекционных процессов в межстекляном пространстве стеклопакетов и рекомендовано разработчиками программного комплекса (Lawrence Berkeley National Laboratory, National Fenestration Rating Council) и подтверждено в испытательных лабораториях НИИСФ РААСН. При этом только варианты 7, 10 и 11 соответствуют нормативным требованиям [32];

- в музейных помещениях необходимо исключить возможность появления конденсата на поверхностях остекления и рам – конденсат чреват опасностью повреждения произведений искусства. В рамках компьютерного моделирования была проведена оценка температур в критических точках конструкций. Оценивать вероятность образования конденсата на внутренних поверхностях фонаря бессмысленно – их температура практически равна уличной, и конденсат в подкрышном пространстве будет гарантирован. Однако, в соответствии с проектом комплексной реставрации [25], предполагается изолировать подкрышное пространство от подфонарного и экспозиционного пространств, и при оценке возможности образования конденсата на внутренних поверхностях контура подфонарника, в подфонарном пространстве были приняты те же параметры микроклимата, что и в экспозиционных залах;

- при сохранении в процессе реставрации исторических металлических конструкций фонаря и подфонарника (варианты 1–7) выпадения конденсата на них весьма вероятны.

Рис. 3. Удивительная «реставрация» светопрозрачных конструкций



Однако в *варианте 7* это возможно как кратковременно, так и при «особо экстремальных» отрицательных температурах наружного воздуха (ниже минус 30 °С);

– теплоизоляционные накладки из пенополистирола не очень сильно влияют на сопротивление теплопередаче, но существенно повышают температуры в критических точках конструкции, что снижает вероятность образования конденсата на рамах.

Рекомендации по реставрации исторических светопрозрачных покрытий

По результатам проведённых обследований были выданы следующие рекомендации по реставрации исторических светопрозрачных покрытий ГМИИ им. А.С. Пушкина, направленные на восстановление и повышение эффективности металлических конструкций двух контуров (фонарь и плафон), установленных в 1912 г. по проекту В.Г. Шухова:

Общие

1. Несмотря на то, что в отчётах [33, 34] сделан вывод о возможности дальнейшей эксплуатации конструкций светопрозрачных покрытий, авторы настоятельно рекомендуют провести дополнительную оценку прочности и работоспособности несущих и остальных металлоконструкций. Это во многом связано как с их неудовлетворительным состоянием, так и с тем, что, в соответствии с проведёнными расчётами, для фонаря рекомендуется использовать стекло в полтора раза тяжелее существующего, а для подфонарника – стеклопакет втрое тяжелее имеющегося сегодня остекления.

2. Следует предусмотреть восстановление систем естественной вентиляции подкрышного пространства, за-

планированных изначально архитектором Р.И. Клейном и заглушённых, судя по всему, при проведении неоднократных последующих ремонтов.

3. Необходимо предусмотреть качественную пароизоляцию экспозиционной зоны от подкрышного пространства для исключения попадания в него влажного воздуха и образования конденсата и изморози на внутренних поверхностях фонаря.

Касательно фонаря

1. В соответствии с расчётами прочности стекла рекомендуется использовать вместо стекла толщиной 4 мм многослойное стекло 3.3.1. При невозможности использования ламинированного стекла из-за недостаточной прочности металлоконструкций возможно использование солнцезащитного закалённого или термоупрочнённого стекла толщиной 5 мм.

2. Металлические конструкции поражены масштабной коррозией, в связи с чем при их реставрации необходимо:

– демонтировать и заменить дефектные элементы конструкции;

– провести их очистку от следов многочисленных покрасок, проведённых за последние 100 лет;

– провести тщательную очистку от ржавчины, а также обработку современными антикоррозионными составами абсолютно всех элементов конструкций;

– есть опасение, что некоторые детали конструкций не подлежат восстановлению и потребуют замены;

– при возможной замене исторических элементов «новоделами» из-за полной невозможности их восстановления необходимо исключить применение современных материалов, которые могут вступать в электрохимическую реакцию с материалами историческими;

– новую окраску элементов металлических конструкций следует проводить только после проведения указанных выше мероприятий.

3. При замене стёкол следует учитывать следующее:

– стёкла в каждом сегменте должны иметь такие размеры по горизонтали, чтобы между стеклом и тавровыми профилями (с обеих сторон) оставался зазор 5–6 мм. Размер стёкол в сегменте по вертикали считать равным расстоянию между серединами горизонтальных стальных уголков минус 10 мм;

– крепление стёкол следует производить с помощью дистанционных двухсторонних самоклеющихся прокладок, например, «Робифлекс». Прокладка «Робифлекс» толщиной 2 мм одной стороной клеится к горизонтальной полке таврового профиля по всей длине, а другой стороной к стеклу. Прокладка «Робифлекс» толщиной 5 мм одной стороной клеится к внешней полке стального уголка по всей длине, а другой стороной – к стеклу;

– после укладки стёкол в сегменты образовавшиеся зазоры (5–6 мм между стеклом и таврами, 10 мм между стёкол по горизонтали) необходимо заполнить герметиком для структурного остекления;

– работы по замене стёкол и реставрации каркаса необходимо производить совместно с кровельщиками для исключения повреждения стёкол после замены стальных листов внизу ската и в коньке крыши;

– установка стеклопакетов или энергосберегающих стёкол для этого контура остекления нецелесообразна, т.к. «продыхи» для вентиляции подстекольного пространства сводят практически «на нет» теплосберегающие свойства данных стёкол;

– восстановление светопрозрачного покрытия фонаря возможно в двух основных вариантах: а) воспроизведение существующей системы, разработанной В.Г. Шуховым, с использованием специальных клеммеров для создания дополнительной вентиляции; б) воспроизведение стандартного для современных светопрозрачных покрытий сплошного остекления фонаря. В первом из них необходимо сохранить (восстановить) предусмотренную при первоначальном строительстве систему дополнительной вентиляции через щели в остеклении,

которые формируются металлическими кляммерами. Для этого необходимо разработать и изготовить новые кляммеры, возможно, из современных полимерных материалов.

4. В связи с неудовлетворительным обслуживанием этого светопрозрачного покрытия, оно становится совсем «не светопрозрачным». Вероятно, следует рассмотреть вопрос об использовании в составе триплекса современных самоочищающихся (гидрофобных) стёкол, которые производятся всеми крупнейшими стекольными компаниями. Покрытия этих стёкол позволяют обеспечивать смывание естественными осадками значительной части загрязнений на стёклах.

5. Абсолютно необходимо предусмотреть устройства защиты подкрышного пространства от прямых солнечных лучей. В ясные дни даже в холодный период года температура в этой зоне превышает все допустимые пределы. В этой связи рекомендуются моторизованные шторы из металлизированных полимерных тканей, которые следует устанавливать на скатах фонарей, выходящих на солнечные румбы горизонта (южный, юго-восточный, юго-западный и западный). Такие солнцезащитные устройства выпускаются многими компаниями (например, одним из ведущих производителей СЗУ компанией *Renson*, Бельгия). Эти устройства могут быть установлены под коньком и не будут нарушать архитектурного облика здания.

Касательно подфонарника

1. Схема реставрации контура подфонарника зависит от решения о том, будут ли сохранены исторические металлические конструкции или же будет произведена их замена. До момента сдачи настоящей статьи в редакцию это решение принято не было.

2. В первом случае оптимальным является вариант 7 (см. выше). При этом следует использовать термоупрочнённые или закалённые наружные стёкла – для того, чтобы минимизировать риски их разрушения и попадания посторонних предметов на остекление плафона.

3. Во втором же случае мы считаем целесообразным использовать один из вариантов эффективных алюминиевых профилей с терморазрывом – например, вариант 13 (см. выше) – и изменить геометрию подфонарника с трапециевидной на треугольную.

4. В любом варианте реконструкции при использовании стеклопакетов (за исключением вариантов 12 и 13) следует использовать теплоизоляционные накладки, которые позволяют значительно повышать температуры в критических точках конструкции.

5. При проведении компьютерного моделирования теплотехнические характеристики подфонарника считались отдельно от плафона. Однако проведённые инструментальные обследования показали, что при совместной оценке этих контуров светопрозрачных конструкций можно добавить ориентировочно $0,25 \text{ м}^2 \cdot \text{°C}/\text{Вт}$ к расчётному сопротивлению теплопередаче конструкции подфонарника.

Касательно плафона

1. В плафоне целесообразно использовать многослойное стекло, составленное из двух закалённых или термоупрочнённых стёкол толщиной по 4 мм каждое или закалённое стекло толщиной 6 мм с защитной рассеивающей плёнкой, выполняющей одновременно функции ламинации стекла и защиты от выпадения осколков стекла в экспозиционные залы.

2. Степень матирования многослойного стекла следует обсудить со специалистами музея, отвечающими за освещение экспонатов. При этом следует использовать плёнку с максимальным коэффициентом светопропускания.

Мы приводим данные рекомендации так подробно именно потому, что все они работают только при их выполнении в полном объёме.

Заключение

Основной целью обследований исторических окон и светопрозрачных покрытий главного здания ГМИИ им. А.С. Пушкина [1, 24, 27, настоящая статья] были объективная оценка актуального состояния этих конструкций, смонтированных в 1912 г., и разработка рекомендаций по их совершенствованию и повышению энергоэффективности с максимальным сохранением элементов, являющихся предметом охраны в соответствии с Федеральным законом от 25 июня 2002 г. N73-ФЗ «Об объектах культурного наследия (памятниках истории и культуры) народов Российской Федерации». Авторы уверены, что в результате многочислен-

ных обследований и компьютерных оценок ими разработаны рациональные рекомендации по использованию современных материалов и определены оптимальные решения по повышению энергоэффективности исторических окон и светопрозрачных покрытий.

Результаты данных обследований могут быть полезны при проведении реставрации исторических зданий. НИИСФ РААСН готов принять участие в подобных работах как в Московском, так и в других регионах РФ.

Авторы очень надеются больше не встретить «реставраций» вроде той, что показана на рис. 3.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Спиридонов А.В., Умнякова Н.П. Обследование состояния (общее и инструментальное) исторических светопрозрачных конструкций ГМИИ им. А.С. Пушкина // Светотехника. – 2019. – № 1. – С. 39–43.
2. URL: https://tybet.ru/content/news/index.php?SECTION_ID=605&ELEMENT_ID=106288&sphrase_id=3536914 (дата обращения: 07.06.2019).
3. URL: https://tybet.ru/content/news/index.php?SECTION_ID=605&ELEMENT_ID=99734&sphrase_id=3536942 (дата обращения: 07.06.2019).
4. URL: https://tybet.ru/content/news/index.php?SECTION_ID=605&ELEMENT_ID=107525&sphrase_id=3536945 (дата обращения: 07.06.2019).
5. URL: <https://www.mk.ru/moscow/2018/11/12/v-rossii-raskryta-set-makhinatorovrestavratovorov.html> (дата обращения: 07.06.2019).
6. URL: https://tybet.ru/content/news/index.php?SECTION_ID=609&ELEMENT_ID=91395&sphrase_id=3536934 (дата обращения: 07.06.2019).
7. URL: https://tybet.ru/content/news/index.php?SECTION_ID=374&ELEMENT_ID=100297&sphrase_id=3536936 (дата обращения: 07.06.2019).
8. URL: https://tybet.ru/content/news/index.php?SECTION_ID=605&ELEMENT_ID=105548&sphrase_id=3536940 (дата обращения: 07.06.2019).
9. URL: https://tybet.ru/content/news/index.php?SECTION_ID=605&ELEMENT_ID=105601&sphrase_id=3536939 (дата обращения: 07.06.2019).
10. URL: https://tybet.ru/content/news/index.php?SECTION_ID=605&ELEMENT_ID=104754&sphrase_id=3536933 (дата обращения: 07.06.2019).
11. URL: https://tybet.ru/content/news/index.php?SECTION_ID=605&ELEMENT_ID=106717&sphrase_id=3536918 (дата обращения: 07.06.2019).
12. URL: https://tybet.ru/content/news/index.php?SECTION_ID=605&ELEMENT_ID=106717&sphrase_id=3536918

ID=105486&spphrase_id=3536946 (дата обращения: 07.06.2019).

13. URL: https://tybet.ru/content/news/index.php?SECTION_ID=605&ELEMENT_ID=98994&spphrase_id=3536938 (дата обращения: 07.06.2019).

14. URL: https://tybet.ru/content/news/index.php?SECTION_ID=605&ELEMENT_ID=104966&spphrase_id=3536958 (дата обращения: 07.06.2019).

15. URL: https://tybet.ru/content/news/index.php?SECTION_ID=605&ELEMENT_ID=105915&spphrase_id=3536919 (дата обращения: 07.06.2019).

16. URL: https://tybet.ru/content/news/index.php?SECTION_ID=605&ELEMENT_ID=103759&spphrase_id=3536931 (дата обращения: 07.06.2019).

17. URL: https://tybet.ru/content/news/index.php?SECTION_ID=605&ELEMENT_ID=104669&spphrase_id=3536947 (дата обращения: 07.06.2019).

18. URL: https://tybet.ru/content/news/index.php?SECTION_ID=605&ELEMENT_ID=99820&spphrase_id=3536957 (дата обращения: 07.06.2019).

19. URL: https://tybet.ru/content/news/index.php?SECTION_ID=605&ELEMENT_ID=105548&spphrase_id=3536940 (дата обращения: 07.06.2019).

20. URL: https://tybet.ru/content/news/index.php?SECTION_ID=606&ELEMENT_ID=99645&spphrase_id=3536920 (дата обращения: 07.06.2019).

21. URL: https://tybet.ru/content/news/index.php?SECTION_ID=605&ELEMENT_ID=106122&spphrase_id=3536943 (дата обращения: 07.06.2019).

22. Борискина И.В., Исайкин А.С., Балакина А.Е. Современные окна для исторических зданий и памятников архитектуры. – Санкт-Петербург: [б.и.], 2019. – 145 с.

23. Khalil A.M.R. et al. Implementing Sustainability in Retrofitting Heritage Buildings. Case Study: Villa Antoniadis, Alexandria, Egypt // Heritage. – 2018. – Vol. 1, No. 1. – P. 57–87.

24. Спиридонов А.В., Умнякова Н.П. Обследование состояния исторических светопрозрачных конструкций ГМИИ им. А.С. Пушкина // Светотехника. – 2019. – № 4. – С. 47–51.

25. «Комплексная реконструкция, реставрация и приспособление под современные музейные технологии главного здания Государственного музея изобразительных искусств имени А.С. Пушкина (г. Москва, ул. Волхонка, д. 12)» (документация, подготовленная Федеральным государственным унитарным предприятием «Центральные научно-реставрационные проектные мастерские»).

26. Руководство пользователя программным комплексом «WINDOW-ТЕСТ» в составе программ «THERM», «WINDOW». – М.: АПРОК-ТЕСТ, 2006. – 140 с.

27. Спиридонов А.В., Умнякова Н.П. Компьютерное моделирование и рекомендации по реставрации исторических све-

топрозрачных конструкций ГМИИ им. А.С. Пушкина // Светотехника. – 2019. – № 2. – С. 72–76.

28. Научно-технический отчёт НИИСФ РААСН по теме: «Теплотехнические расчёты зоны светопрозрачного покрытия объекта «Комплексная реконструкция, реставрация и приспособление под современные музейные технологии главного здания Государственного музея изобразительных искусств имени А.С. Пушкина». – М., 2018. – 88 с.

29. СП 131.13330.2012 «Строительная климатология. Актуализированная редакция СНиП 23–01–99».

30. ГОСТ 26602.1–99 «Блоки оконные и дверные. Методы определения сопротивления теплопередаче».

31. ГОСТ Р 54861–2011 «Окна и наружные двери. Методы определения сопротивления теплопередаче».

32. СП 50.13330.2012 «Тепловая защита зданий», Актуализированная редакция СНиП 23–02–2003 (с Изменением № 1).

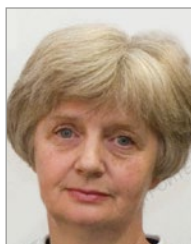
33. Научно-технический отчёт НИИО-СП им. Н.М. Герсеева по теме «Комплексная реконструкция, реставрация и приспособление под современные музейные технологии главного здания Государственного музея изобразительных искусств им. А.С. Пушкина (г. Москва, ул. Волхонка, д. 12). Том 4. Результаты обследования металлических фонарей здания». – М., 2015. – 460 с.

34. Научно-технический отчёт НИЦ «Строительство» «О коррозионной стойкости существующих несущих конструкций покрытия». Том 3, 2018. – 109 с.



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



Умнякова Нина Павловна, доктор техн. наук, доцент. Окончила МИСИ. Зам. директора НИИСФ РААСН по научной работе. Область научных интересов: тепловая защита зданий,

энергосбережение, оценка теплозащитных качеств наружных ограждений при наличии отражательной теплоизоляции

Представители Ассоциации наружного освещения на примере Санкт-Петербурга и Казани обсудили практику внедрения инноваций

23 июня Ассоциация наружного освещения под руководством директора СПб ГБУ «Ленсвет» С.В. Мителева провела вторую рабочую встречу в формате видеоконференцсвязи. Участниками дистанционного общения, которое уже приобрело регулярную форму взаимодействия, стали представители эксплуатирующих объекты уличного и архитектурного освещения компаний из Москвы, Санкт-Петербурга, Перми, Саранска, Уфы, Саратова, Казани, Екатеринбурга, Севастополя.

Члены Ассоциации на примере Санкт-Петербурга обсудили практику внедрения инноваций, работу технического совета, планы пилотной эксплуатации инновационного оборудования и материалов на 2020 год. Генеральный директор АО «Казэнерго» Д.Р. Саляхов поделился опытом реализации энергосервисных контрактов в наружном освещении города Казани. Встреча получилась интересной и познавательной.

lensvet.spb.ru
02.07.2020

Опечатка в № 2 за 2020 г.

Редакция приносит свои извинения читателям журнала за ошибку, допущенную при публикации комментария Коробко А.А. к статье Сенгиза М.С. «Влияние наклона светильника и топологии осветительной установки на характер дорожного освещения» (С. 55).

Ошибка была допущена в рис. 1. (Типы распределения уличных ОП). Ниже приведён правильный рисунок.

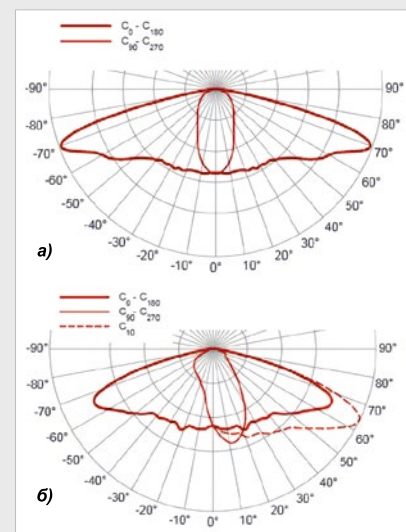


Рис. 1. Типы светораспределения уличных ОП: а – ШЮ; б – ШБ

Методика обучения световому дизайну по направлению «Дизайн архитектурной среды»

В.Е. КАРПЕНКО

Дальневосточный федеральный университет (ДВФУ), Владивосток
E-mail: vekarpenko@gmail.com

Аннотация

Проблема становления новой профессии «светодизайнер» во многом заключается в создании методики обучения, в совместной образовательной работе архитекторов, светотехников, психологов, колористов, социологов и во взаимной осознанности ими важности проработки как художественной, так и технической сторон освещения. С начала 2000-х во Владивостоке ведётся работа по созданию методики обучения световому дизайну, результаты которой представлены в студенческих работах и некоторых теоретических проектах, методических и учебных пособиях, научных статьях. Методика строится на: современных примерах и теории отечественного и зарубежного светового дизайна; изучении медиафасадов

и световых поверхностей, световых инсталляций, светового дизайна архитектурных ансамблей; моделировании световых панорам города и пространств городских набережных; обучении основам световой композиции. Статья раскрывает логику учебного процесса (который начинается с создания световой композиции к моделированию световой панорамы и светового ансамбля и формированию ночных архитектурно-средовых пространств города) и касается методического обеспечения светового дизайна по направлению «дизайн архитектурной среды» и образования светодизайнеров.

Ключевые слова: светоцветовое моделирование, световая панорама, световой ансамбль, архитектурно-световая среда, световая композиция, световой макет, образование.

Предисловие

Не так давно в журнале «Светотехника» прошла дискуссия о проблемах и перспективах светового дизайна [1–4]. Сегодня созданы и работают несколько крупных образовательных проектов в области светового дизайна, архитектуры и искусства как в государственных, так и в частных учебных заведениях. В большом вузе, где практически каждый учебный год студенты – главные авторы практических работ – меняют художественные вкусы, стилистику подачи и выполнения курсовых проектов, можно предлагать новые задания и объекты моделирования, совершенствовать и проверять методические концепции. Действительность заставляет проводить занятия по развитию навыков оперативной и быстрой презентации основных идей в форме скетчей. Большим стимулом к этому развитию послужило внедрение в учебный процесс расчётных компьютерных программ, что повысило технический уровень практических работ в части светоцветового моделирования архитектурной среды. Публикации многих научных статей, монографий и учебных пособий, реализация светодизайнерских

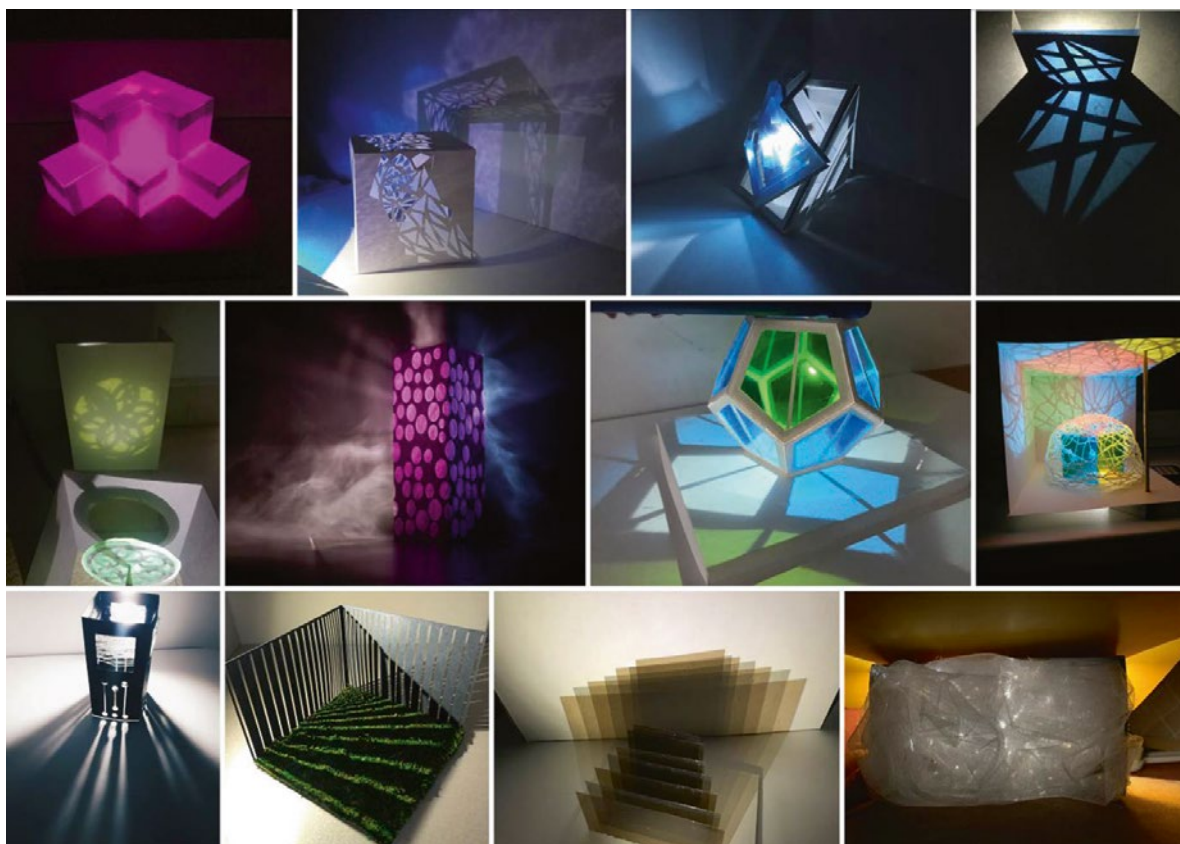


Рис. 1. Учебно-практическая работа «Световая композиция» (студенты ДВФУ, 2019 г.)



Рис. 2. Компьютерное моделирование световой панорамы визуального бассейна бухты Фёдорова Амурского залива в г. Владивосток: а – формирование светового ритма и освещение воды в концепции формирования ночной панорамы (О.В. Романенко, студент ДВГТУ, 2008 г.); б – формирование световых доминант (А.Ю. Балаева, студент ДВГТУ, 2009 г.)

проектов отечественных и зарубежных авторов и развитие электроники позволили сформулировать новые методики создания световой среды.

Световая композиция в обучении

Создание новых творческих методов и приёмов освещения, стремление расширить палитру светокомпозиционных возможностей в формировании светового образа объектов среды потребовало разработки теории световой композиции, построенной на изобразительной практике оптического искусства (оп-арт). На лекциях изучается развитие оп-арта в Италии в 1960-х гг., рассматриваются принципы и творчество всемирно известных художников этого вида визуального творчества Джеймса Таррелла, Томаса Уилфреда, Виктора Вазарели и др. [5–8]. Согласно учебно-практическому заданию, необходимо создание объёмно-пространственной или фронтальной композиции с применением средств художественной выразительности оп-арта, используя отражение, преломление, поглощение и просвечивание естественного или искусственного света. В композиции могут применяться световая кинетика, цветной свет с включением зер-

кальных, блестящих или матовых поверхностей – для достижения психологического эффекта глубинности и других оптических иллюзий (рис. 1). Технически реализация многочисленных художественных приёмов в световой композиции решается с помощью миниатюрных светодиодных ИС разного цвета (в частности, светодиодных лент), беспроводных управляющих устройств («диммеров») и пультов управления [9, 10].

Светоцветовое моделирование архитектурных панорам Владивостока в учебно-практических работах

Выраженный рельеф города и многие видовые точки на сопках, а также доминирование бухты Золотой Рог и Амурского залива в центральной части Владивостока дают возможность туристам и жителям наблюдать его вечерне-ночные световые панорамы. Средствами светокомпозиционного моделирования панорам можно менять их визуальную форму и насыщать новыми световыми доминантами и акцентами. В 2008 г. в рамках практических заданий предварительно изучалась дневная панорама Владивостока – отмечались архитектурная

монотонность застройки и отсутствие благоустройства набережных. В результате компьютерного моделирования были добавлены световые и цветовые доминанты, выделен ландшафт, освещены фасады и пространство набережной, введены световые акценты в воде (рис. 2, а). Далее, в 2009 г., в рамках учебно-практических заданий намечались первичные подходы к формированию световой панорамы с использованием опроса и метода семантического дифференциала¹ (рис. 2, б).

В 2010 и 2012 гг. с целью детального изучения визуального восприятия формы светопанорамы Владивостока и предложения её проектного варианта были проведены статистические исследования (анкетирование), в которых снова использовался метод семантического дифференциала. В опросе приняли участие горожане и студенты архитекторы-дизайнеры. Изучалось их мнение о современной форме

¹ Семантический дифференциал – количественный метод выявления субъективного восприятия исследуемого объекта с помощью семибальной шкалы оценок от резко отрицательного (–3) через нейтральное (0) до положительного (+3) отношения. Метод был впервые введён американским психологом Чарльзом Осгудом в 1952 г.

и особенностях световой панорамы. С учётом полученных данных были сделаны выводы об эстетическом, художественно-психологическом и архитектурно-градостроительном аспектах восприятия дневных и вечерних панорам Владивостока – противоположных берегов бухты Золотой Рог. Были созданы компьютерные модели световых панорам, размещены новые световые доминанты, подчеркнуты искусственным светом существующие архитектурные вертикали и сформирован новый световой силуэт.

Архитектурно-художественное освещение улиц Светланская, Адмирала Фокина и Океанского проспекта во Владивостоке

В 2013 г. был представлен учебный проект «Концепция архитектурно-художественного освещения улицы Светланская и Океанского проспекта в г. Владивосток». В этой работе для многих исторических зданий с выразительной архитектурной пластикой, находящихся в центральной части города, были созданы графические, цветовые и световые модели с художественными приёмами освещения. Первоначально основная идея светового дизайна заключалась в формировании единого светового вечернего фасада улиц. Однако позднее, в 2014 г., возникла концепция освещения продолжения улицы Светланской как парадного интерьерного пространства и моделирования сомасштабных пешеходу световых эффектов. С точки зрения образности пространство улицы представлялось как галерея, наполненная торжественным светом уличных фонарей жёлтого света. При этом освещались начальные и завершающие композиционные формы – «световые башни и ризалиты», соответствующие архитектурным элементам фасадов исторических зданий. Для светового дизайна некоторых вертикальных доминант и зданий со стеклянными фасадами были использованы технологии медиафасадов с применением цветных светодиодных ИС [9].

В рамках практической работы по дисциплине «Светоцветовое моделирование в дизайне городской среды» при проектировании художественного освещения улицы Адмирала Фокина учитывались её историческая и пешеходная среды, выразительность пластики зданий и восприятие свето-

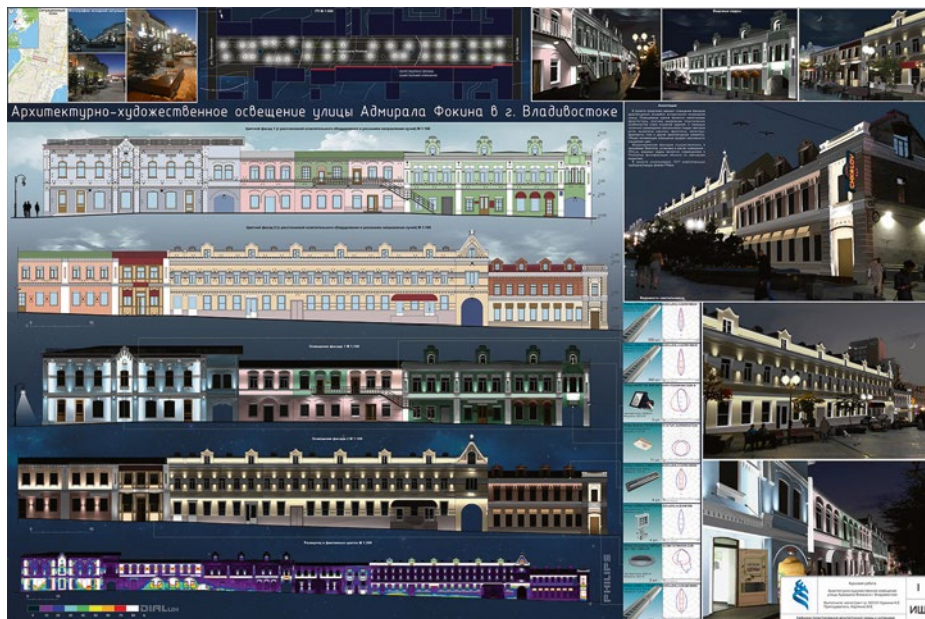


Рис. 3. Архитектурно-художественное освещение улицы Адмирала Фокина в г. Владивосток (А.Е. Куркина, магистрант ДВФУ, 2017 г.). Проект представлялся на конкурсе «Российский светодизайн» в 2017 г. в рамках Международной выставки «Interlight Moscow powered by light + building», г. Москва

вой композиции фасадов на уровне глаз человека (рис. 3). При проектировании освещения использовалось тёпло-белое освещение, подчёркивающее первичную колористику фасадов. Локальный и контурный свет акцентирует внимание на элементах фасада. Светильники направленного света создают световой ритм, а разнонаправленные световые пучки – эффект объёмного светового рисунка. Линейные светодиодные светящиеся элементы (СЭ) выявляют карнизы. Дальнейшие исследования по архитектурной среде данной улицы касались светопро пространственных харак-

теристик (В.Е. Карпенко, В.И. Крючкова, А.Е. Куркина, О.С. Шлыкова, 2017 г.). Измерялись горизонтальная и вертикальная освещённости, рассчитывались уровни полуцилиндрической освещённости, контраста и равномерности освещения, оценивался светомоделирующий эффект и были сделаны выводы о светокомпозиционных параметрах, светонасыщенности, комфортности и безопасности в вечернем пешеходном пространстве улицы Адмирала Фокина [9].

Следующий учебно-методический шаг, обусловленный градостроительной ролью панорамы как активного

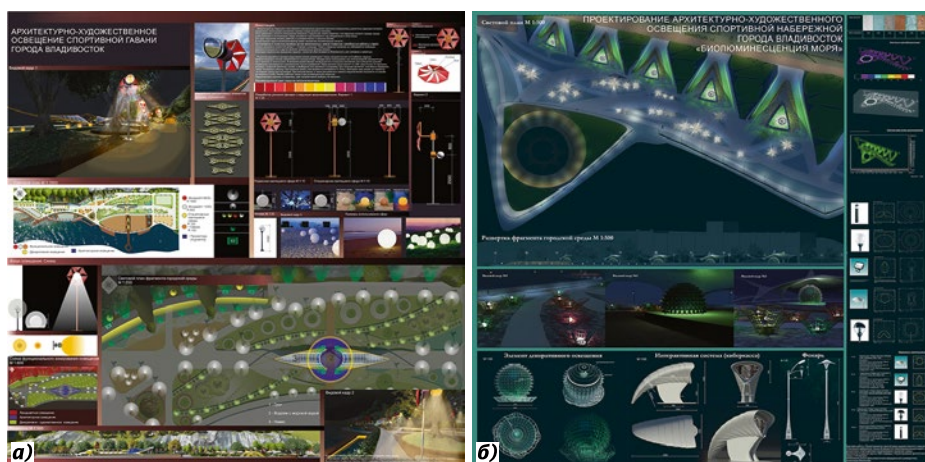


Рис. 4. Световой дизайн набережных в практических работах студентов ДВФУ: а – архитектурно-художественное освещение Спортивной гавани г. Владивосток (Е.С. Киселёва, студент ДВФУ, 2014 г.); б – проектирование архитектурно-художественного освещения Спортивной набережной («Биолюминесценция моря») в г. Владивосток (А.И. Воронцова, студент ДВФУ, 2014 г.) [9, 10]



Рис. 5. Архитектурно-художественное освещение набережной Спортивной гавани и набережной Цесаревича в г. Владивосток (О.С. Шлыкова, магистрант ДВФУ, 2017 г.)

визуального фона прибрежного города, – переход к проектированию освещения пространств набережных.

Светоцветовое моделирование набережных

Некоторые прибрежные части в центре Владивостока исторически не являются рекреационными зонами. Сегодня происходит частичный перенос производства и судоремонта в другие места, что приводит к появлению единой пешеходной среды, которая может стать безопасной, комфортной и эстетически-выразительной вечером и ночью. Для берегов бухты Золотой Рог и Амурского залива разрабатывались курсовые проекты уникальных общественных и жилых зданий, музейных и ландшафтно-парковых комплексов. Проектирование

новой архитектурной среды в прибрежной части города включает художественное освещение с применением инновационных технологий и морской семантики. Например, в работе Елены Киселёвой разработаны энергосберегающие фонари в современном дизайне, сочетающие ветрогенераторы и светодиодные ИС (рис. 4, а). В проекте Александры Воронцовой представлены интерактивные системы в виде световых бионических композиций, созданы оригинальные художественно-световые эффекты в малых архитектурных формах набережной и элементы декоративного освещения (рис. 4, б).

В дальнейшем принципы моделирования освещения набережных получили развитие в некоторых проектах бакалавров, в которых была выявлена образно-художественная, градостро-

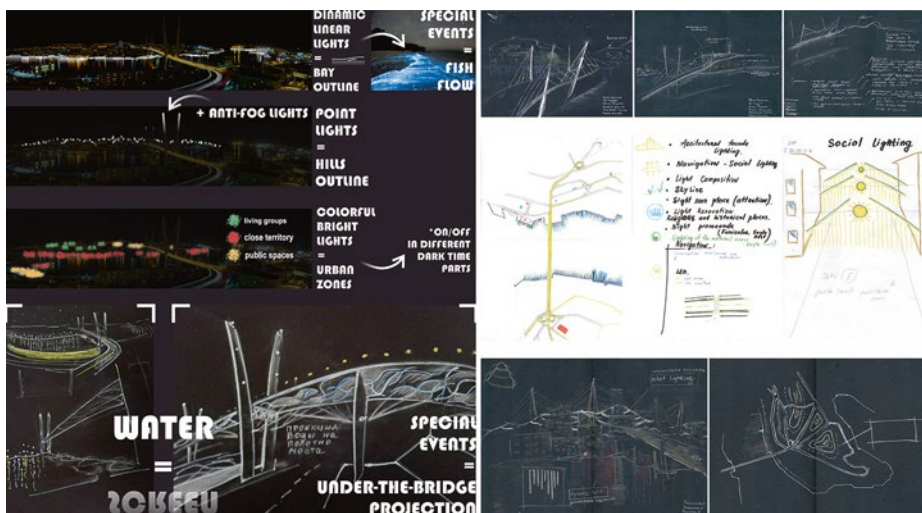
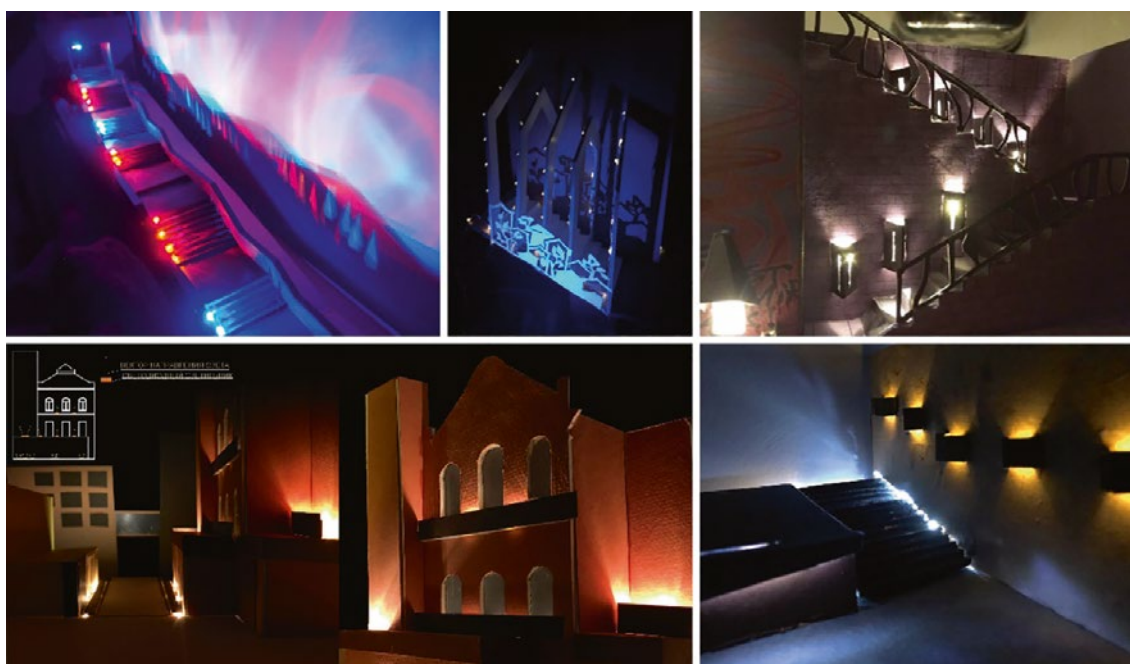


Рис. 6. Концепции освещения Владивостока и проектные результаты мастер-класса «Световой урбанизм и методика создания светового мастер-плана» под руководством Роже Нарбони (студенты ДВФУ, 2018 г.)

ительная роль искусственного света и сформулированы принципы проектирования ночной среды набережных (студенты ДВФУ, 2016 г.). В проектах можно увидеть световые эффекты «полёт над землёй» и «парение над морем» разных вариантов, а также светодекоративные приёмы «звёздность» и «свечение планктона» в пешеходных мощениях (с помощью миниатюрных светодиодов). Плавная световая графика напоминает формы морских животных, а контурное освещение воспроизводит символы цифровых технологий. Свет является активным компонентом средовых объектов в сочетании со светопропускающими и светоотражающими материалами и энергосберегающими технологиями, выделяет конструктивные узлы, выполняет предупреждение на границе открытого пирса и воды [9].

Две практические работы по световому дизайну пешеходных пространств набережных были награждены на конкурсе «Российский светодизайн» в Москве в 2016 г. Константин Расулов получил 1 место за проект «Архитектурно-художественное освещение Спортивной набережной г. Владивостока», а в 2017 г. Оксана Шлыкова тоже заняла 1 место за проект «Архитектурно-художественное освещение набережной Спортивной гавани и набережной Цесаревича в г. Владивостоке» (рис. 5). В проекте О. Шлыковой идеи освещения малых архитектурных форм явились проектным материалом для магистерской работы «Проблемы организации световой среды приморских набережных в г. Владивостоке» [11], которая была с успехом защищена в 2018 г. Она посвящена разработке комплексных принципов освещения набережных, ограждающих её «фасадов-кулис» и окружающего ландшафта. Для формирования благоприятной психологической атмосферы были предложены концептуальные проекты формирования световой среды набережных Цесаревича, Спортивной гавани (рис. 5) и СК «Олимпиец» с учётом градостроительного анализа, выявленных недостатков и особенностей светоцветовой ситуации существующих пространств. Световые планы набережных выявляют композиционные оси, архитектурно-световые акценты и доминанты, транспортные и пешеходные связи между светопланировочными элементами среды набережных.

Рис. 7. Моделирование освещения фрагментов городской среды Владивостока (студенты ДВФУ, 2018 г.)



В соответствии с моделью светопространства и выбранной концепцией решались проблемы освещения набережных на трёх уровнях: градостроительном, ансамблевом и объектном.

Мастер-классы, воркшопы и лекции специалистов-светодизайнеров

Современный подход к обучению световому дизайну содержит активный компонент, включающий натурную оценку распределения яркостных контрастов и световых полей, измерение светотехнических параметров (освещённость и яркость) и затем (на основе полученных данных) создание концепции освещения города. В 2015 г. визит Н.И. Щепеткова в ДВФУ по программе «*Visiting Professors*» включал ознакомление с архитектурно-световой средой Владивостока и цикл лекций «Световой дизайн города», посвящённый вопросам истории, теории и средств современного светодизайна. По окончании лекций были проведены мастер-класс по поиску светового образа для исторических зданий (на примере здания Главпочтамта Владивостока) и консультация студентов по светодизайну объектов и выбору их светового образа [9].

В 2018 г. также по программе «*Visiting Professors*» провёл лекции, мастер-класс и воркшоп Роже Нарбони (всемирно известный французский светодизайнер, преподаватель про-

фессиональных и учебных курсов по световому дизайну во Франции и других странах). Совместно со студентами был проведён выезд на территорию вечернего города и его характерные видовые площадки в районе фуникулёра и Оперного театра – на два противоположных берега бухты Золотой Рог в центре Владивостока. Были зафиксированы динамика архитектурно-световой среды, преобладающий спектральный состав искусственного света и светокомпозиционная роль архитектурных доминант. Данное обследование послужило творческим стимулом к размышлению, подготовке и созданию четырёх концепций светового мастер-плана Владивостока (рис. 6) [9].

Проектирование освещения туристических маршрутов Владивостока

Владивосток вызывает большой интерес у туристов в любое время суток. Однако вечерние и ночные улицы города небезопасны, а недостаточное освещение не позволяет видеть памятные и мемориальные доски и таблички, объекты исторической архитектуры и ландшафт; различные памятники, мемориалы и скульптуры толком не выявляются. Между тем в тёмное время суток исторический центр Владивостока можно освещать как музейное пространство, его улицы с достопримечательными объектами способны формировать музейную экспозицию, искусственный разно-

цветный свет может направлять туристов, создавать настроение и камерность туристических путей и средовых пространств, подчёркивать их уникальность и историко-культурную ценность. Чтобы решить данный комплекс средовых проблем была предложена практическая работа по созданию макета фрагмента городского пространства. Пять студенческих авторских коллективов создавали освещение с помощью макета с использованием небольших фонариков или декоративных гирлянд с сетевым или автономным питанием. В макетах делались прорези, в которые вставлялись миниатюрные светодиодные СЭ той или иной цветности излучения отбрасывали тени и бросали лучи на макетные стенки, ступеньки, ограждения и пр. Затем делались фотографии и видеоролики (рис. 7). В одной из работ с помощью осветительных приборов проецируются узоры на противоположные стены, создавая некий общий уровень светонасыщенности, тогда как в другой развивается тема японской символики, где рисунок ограждения содержит мотивы сакуры, Фудзиямы, формы крыш, красный цвет (причём узор проектируется на стены и создаёт цветные тени). Моделирование нового освещения в исторической среде города не контрастирует с окружающим световым дизайном, тёплый оттенок света на прилегающих фасадах повторяется в новых световых эффектах. Спон-

танно возникшие граффити на стенах вечером акцентируются нейтрально-белым светом. В исторической среде светом выделяются пластика фасадов, фрагменты стен и карнизы, создаются световой ритм и разные оптические эффекты сокращения или расширения камерных пространств.

Результаты

При формировании методики обучения световому дизайну и в процессе обучения обнаружилась логическая взаимосвязь использования световых эффектов в оп-арте, современном визуальном искусстве и учебных световых композициях.

Крупномасштабная визуальная форма световой панорамы позволяет программировать в её пространстве новые световые доминанты, акценты и фон, акцентировать существующие элементы и переходить к детальному проектированию световых ансамблей в городской среде. В этом случае ночная панорама является художественно-образительным полотном, на котором художник-светодизайнер рисует световые пятна, штрихи и точки.

Пространство улицы ограничивают освещённые фасады зданий, витрины, реклама, навигация и разные виды других световых форм, которые усложняют архитектурно-световую среду. Параллельно требуется учитывать светообъёмные параметры. В этой связи пространство города и объём зданий можно разбивать на более элементарные освещённые градостроительные и композиционные элементы, предотвращающие световой хаос и ограничивающие количество искусственного света.

С точки зрения световой структуры и восприятия с акватории набережные замкнуты городской световой панорамой, освещение которой может строиться на основе светокомпозиционных приёмов и принципов, а световые эффекты могут основываться на образах, символической и семантике прибрежного города и воды.

Использование активных методов обучения с выездом на территорию и исследованием ночной среды с помощью измерительных приборов с последующим обсуждением и созданием концепций освещения города, а также международные воркшопы в России и за рубежом, на площадках которых создаются све-

товые инсталляции и дизайн освещения фрагментов городских пространств при помощи осветительного оборудования, вносят определённый учебно-методический вклад, позволяющий выделять важность практической части образовательного процесса. Подобная учебно-методическая активность позволила оформить новые идеи и подходы в моделировании искусственного света с использованием макетов-эскизов существующей территории города. При этом в макете фрагмента среды можно уловить момент, атмосферу и проследить прохождение лучей через макетные элементы благоустройства, объекты малого дизайна, стрит-арта и ограждающие поверхности.

Обсуждение. Перспективы исследований

Проведение воркшопов, мастер-классов и использование активных методов обучения в световом дизайне может дополнить аудиторные занятия и акцентировать учебный процесс в практической области, в реальной архитектурно-световой среде города с применением ИС разных производителей.

Методика освещения может включать создание световых макетов фрагментов городской среды с включением цветных участков, изменение цветности и композиционные приёмы освещения которых могут проверяться в лабораторных условиях при освещении их разными пробными ИС. При этом моделирование освещения с помощью миниатюрных ИС на макетах фрагментов городской среды может давать большие практические и художественные результаты.

Оценка и анализ измеренных фотометрических параметров (освещённость и яркость) в городской среде могут показывать направления к получению необходимых светомоделирующих эффектов, равномерности освещения и светонасыщенности при достижении образности и художественной выразительности, зрительного и психологического комфорта и достаточной безопасности.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Дискуссия по проблеме светового дизайна // Светотехника. – 2018. – № 3. – С. 72–82.

2. Дискуссия по проблеме светового дизайна // Светотехника. – 2018. – № 4. – С. 80–93.

3. Дискуссия по проблеме светового дизайна // Светотехника. – 2018. – № 5. – С. 79–86.

4. По теме статьи Быстрынецовой Н.В., Лекус Е.Ю., Матвеева Н.В. Школа отечественного светодизайна: стратегии и тактики // Светотехника. – 2015. – № 4. – С. 65–66 (Карпенко В.Е., Лебедкова С.М., Овчаров А.Т., Санжаров В.Б., Силкина М.А., Снетков В.Ю., Хаджин А.Г., Щепетков Н.И.) // Светотехника. – 2015. – № 5. – С. 60–67.

5. *Govan M., Kim C.Y.* James Turrell. A Retrospective. Los Angeles Country Museum of Art. – Munich, London, New York: DelMonico Books. Prestel Verlag, 2013. – 304 p.

6. *Holzhey M.* Victor Vasarely. 1906–1997. Pure Vision. – Köln: Tashen, 2005. – 96 p.

7. ITALIAN ZERO & avantgarde'60s. – Cinisello Balsamo, Milano: Silvana Editoriale Spa, 2011. – 288 p.

8. *Orgeman K.* Lumia: Thomas Wilfred and The Art of Light. – New Haven: Yale University Art Gallery, 2017. – 172 p.

9. *Карпенко В.Е.* Светоцветовое моделирование городской среды: учебное пособие для вузов / Инженерная школа ДВФУ. – Владивосток: Дальневост. федерал. ун-т, 2019. – 153 с. – 1 CD. – ISBN978-5-7444-4460-0.

10. *Karpenko V.E.* Educational complex of light-colored modeling of urban environment // SHS Web of Conferences. The 4th International Research-to-Practice Conference Lighting Design – 2017 (LD-2017) (St. Petersburg, Russia, October 12–13, 2017) (Lighting Design 2017). – Vol. 43 (2018). – 9 p. URL: <https://doi.org/10.1051/shsconf/20184301013> (дата обращения: 15.02.2020)

11. *Шлыкова О.С.* Проблемы организации световой среды приморских набережных в г. Владивостоке / Автореферат диссертационной работы по образовательной программе подготовки магистров по направлению 07.04.03 «Дизайн архитектурной среды», профиль «Проектирование городской среды». – Владивосток: ДВФУ, 2018. – 31 с.



Карпенко Владимир Евгеньевич, кандидат архитектуры, доцент. Окончил в 1999 г. Дальневосточный Государственный технический университет. Доцент кафедры «Проектирование архитектурной среды и интерьера» Инженерной школы ДВФУ. Член Союза архитекторов России

Зависимость цветовых предпочтений от пола: предварительное исследование¹

Ч. ХУАН¹, Ц. ЛЮ^{1,2,*}, И. ЛЮ¹, М. ПОЙНТЕР³, П. БОДРОГИ⁴,
Т.К. КХАН⁴, А. ЛЮ⁵

¹ Уханьский университет, Ухань, Китай

² Хубейский научно-исследовательский центр цифровизации и виртуального воспроизведения цветной информации, содержащейся в культурных ценностях, Ухань, Китай

³ Лидский университет, Лидс, Великобритания

⁴ Дармштадтский технический университет, Дармштадт, Германия

⁵ Компания *Shenzhen Chromatech Lighting Co., Ltd.*, Шэньчжэнь, Китай

* E-mail: liuqiang@whu.edu.cn

Аннотация

Гендерные различия наблюдались во многих областях. Однако применительно к связанным с освещением цветовым предпочтениям этот вопрос почти не рассматривался. Поэтому в данной работе были проведены исследования по определению предпочтительной коррелированной цветовой температуры (КЦТ) (3500, 5000 или 6500 К) при зрительном восприятии шести одноцветных (красного, зелёного, жёлтого, синего, белого и чёрного цвета) искусственных объектов, выполненных в виде птиц. Исследования проводились применительно к трём уровням освещённости E : 50, 200 и 600 лк. Двадцать наблюдателей, 10 мужчин и 10 женщин, должны были сообщить о своих зрительных цветовых предпочтениях при восприятии экспериментальных объектов. Цель этой работы состояла в том, чтобы установить наличие или отсутствие гендерных различий при оценке наблюдателями имеющих разные цвета объектов при разных комбинациях E и КЦТ. Полученные результаты говорят о том, что при $E = 200$ и 600 лк наблюдаются большие различия в восприятии мужчин и женщин, особенно при высоких – 5000 и 6500 К – значениях КЦТ. Кроме того, было установлено, что при определённых комбинациях E и КЦТ оценки предпочтительности, сделанные мужчинами и женщинами применительно к некоторым цветам, были явно разными. Для некоторых сценариев субъективные оценки наблюдателей одного пола также зависели от цвета объекта.

Ключевые слова: гендерные различия, цветовые предпочтения, кор-

релированная цветовая температура, освещённость.

1. Введение

Цветовые предпочтения в настоящее время являются популярным объектом исследований в областях, связанных с оценкой качества освещения [1–9]. Целью этих работ является определение того, какие источники света наблюдатели считают предпочтительными с точки зрения передачи цветов освещённых объектов [1, 10–12], с тем, чтобы выявить факторы, влияющие на предпочтительность зрительного восприятия цвета [1, 8, 13–18], и разработать объективную метрику, увязанную с субъективным восприятием цвета, которое было выявлено в ходе психофизических исследований [19–23]. Согласно новейшим литературным данным, в случае освещения на цветовые предпочтения влияют несколько факторов, в том числе от области применения освещения [15, 16], региональных или культурных различий [6, 7, 18, 24–26], освещённости [27], знакомства с экспериментальным объектом [13], цветовыми особенностями освещаемых объектов [28], а также от белизны источника света [1, 10, 29, 30].

В нашей последней работе, посвящённой поиску оптимального освещения джинсов, были выявлены существенные гендерные различия в части цветовых предпочтений и различения цветов [2]. Согласно полученным в этой работе результатам, гендерные различия в части цветовых предпочтений изменяются в зависимости от области применения освещения. Женщины продемонстрировали большую способность к различению цветов, чем мужчины. Фактически, ана-

логичные результаты были получены и в смежных областях, таких как генетика [31], неврология [32], офтальмология [33], биология [34] и цветоведение [35]. Например, с точки зрения генетики, спектральные чувствительности многих фоторецепторов сетчатки определяются генами X-хромосом [36], и это считают возможным объяснением гендерных различий в восприятии цвета [37]. Более того, согласно [34], эти различия можно объяснить зависящей от пола функциональной специализацией, сформировавшейся в процессе эволюции трудовой деятельности.

Однако хотя многие исследования, проводящиеся в смежных областях, подтвердили наличие подобных различий между мужчинами и женщинами, вопрос цветовых предпочтений в случае освещения не привлекал к себе достаточно внимания. Действительно, для современной литературы характерно несбалансированное привлечение наблюдателей мужского и женского пола [15, 16, 18, 27, 38–49], и мы подозреваем, что подобная небрежность может в некоторой степени повлиять на общие выводы.

Поэтому в данной работе были проведены три группы психофизических экспериментов, целью которых являлось подтверждение наличия гендерных различий в части связанных с освещением цветовых предпочтений. Мы предположили, что подобные различия могут быть связаны как с условиями освещения, так и с цветовыми характеристиками экспериментальных объектов, так что для проведения исследований были выбраны источники света, обеспечивающие разные уровни освещённости (E) и коррелированной цветовой температуры (КЦТ), а так-



Рис. 1. Экспериментальная сцена с красной птицей в световой камере (искусственный декоративный объект в виде птицы)

¹ Перевод с англ. Е.И. Розовского

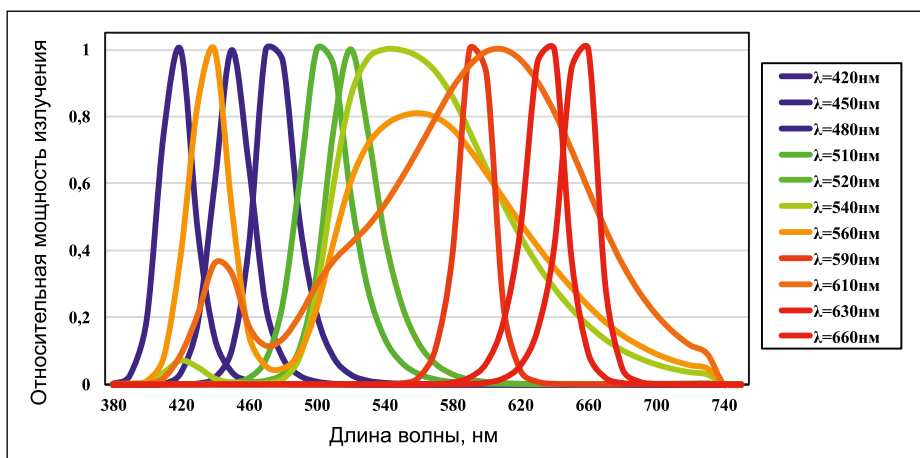


Рис. 2. Относительные спектральные распределения мощности излучения 11 СД каналов кубической СД установки

же выполненные в виде птиц декоративные объекты, окрашенные в разные насыщенные цвета. Кроме того, так как эксперименты были сгруппированы применительно к уровням E (например, в каждом из экспериментов наблюдатели оценивали свои цветовые предпочтения при различных КЦТ и одном и том же значении E), то результаты данной работы должны также обеспечить более хорошее понимание того, какие КЦТ будут предпочтительными при разных уровнях освещённости.

2. Методика проведения экспериментов

2.1. Экспериментальная установка

В данной работе зрительные эксперименты проводились с использованием световой камеры (рис. 1) размером (Ш×Г×В) 50×50×60 см. Стенки

и пол камеры были равномерно покрашены серой матовой краской (*Munsell N7*). Стул был поставлен перед камерой на расстоянии примерно 40 см, так что угол наблюдения был равен примерно 30°. Кроме того, высоту стула можно было регулировать, так чтобы при проведении экспериментов ни один из наблюдателей не мог видеть осветительный модуль, который был установлен сверху камеры.

Девять спектров излучения генерировались кубическим спектрально регулируемым умным осветительным прибором с СД, предоставленным компанией *Changzhou Thouslite Ltd.* Это устройство могло реализовывать большое количество неизменных во времени спектральных распределений мощности излучения, что достигалось посредством смешивания излучения 11 СД каналов, осуществлявшегося внутри осветительного прибора (рис. 2). Выбранные СД источники света имели три значения

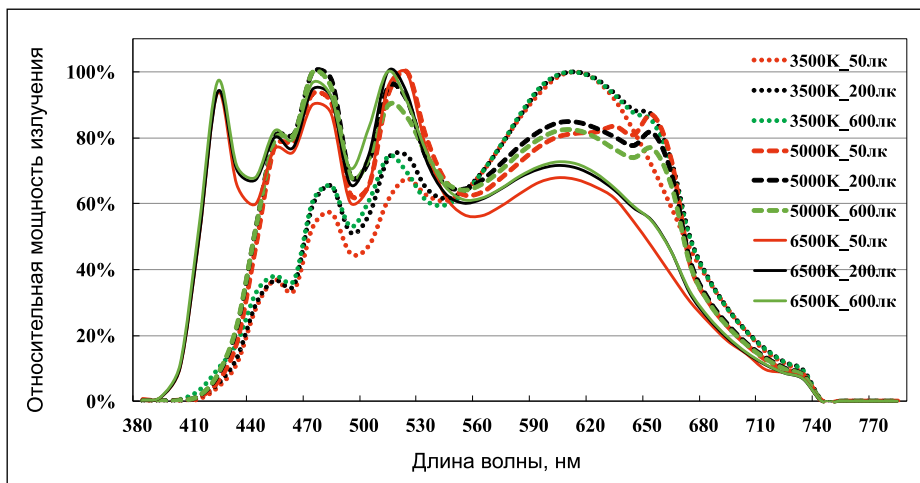


Рис. 3. Относительные спектральные распределения мощности излучения экспериментальных источников света

КЦТ (3500, 5000 и 6500 К) и могли обеспечить три уровня освещённости (50, 200 и 600 лк). Для калибровки этих спектров использовался спектрофотометр *X-Rite i1 Pro 2*. Спектральные распределения мощности излучения источников света приведены на рис. 3. Были рассчитаны как колориметрические характеристики экспериментальных источников света, так и некоторые типичные параметры, характеризующие качество цвета (табл. 1).

Из табл. 1 следует, что характеризующие качество цвета параметры источников света, имеющих одну и ту же КЦТ, не противоречат друг другу. Поэтому расхождение результатов, полученных при разных уровнях E , можно отнести на счёт различий именно в E . В то же время, обратите внимание на то, что значения Duv , соответствующие имеющим одну и ту же КЦТ источникам света, не вполне согласуются друг с другом, что связано с ограниченностью возможностей умного осветительного прибора. А именно, при настройке источников света с целью обеспечения согласованности характеризующих качество цвета параметров, эти значения Duv оказались наилучшими из всех, которые удалось обеспечить при помощи нашего осветительного прибора. Мы считаем, что столь небольшими несовпадениями значений Duv (~ 0,002) можно пренебречь по сравнению с большими изменениями КЦТ (~ 1500 К). Кроме того, значения общего индекса цветопередачи оказались не меньшими, чем 90, а это говорит о том, что формы участков, охватываемых цветовыми гаммами (*gamut shapes*) [16] этих источников света являются нормальными и также согласуются друг с другом.

2.2. Подход к проведению исследований

В качестве экспериментальных объектов использовались шесть выполненных в виде птиц искусственных декоративных объектов, имеющих одинаковую форму и размеры (примерно 10 x 37 x 28 см). Эти птицы были окрашены в следующие умеренно насыщенные цвета: красный (К), зелёный (З), синий (С), жёлтый (Ж), чёрный (Ч) и белый (Б). Их коэффициенты отражения были измерены при помощи калиброванного спек-

Колориметрические характеристики экспериментальных источников света

Характеристика*	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Уровень E , лк	50	200	600	50	200	600	50	200	600
Уровень $T_{ц}$, К	3500	3500	3500	5000	5000	5000	6500	6500	6500
Измеренная E , лк	52	203	603	48	210	600	52	204	602
Измеренная КЦТ, К	3412	3523	3529	4956	5005	5102	6624	6520	6604
Duv	0,0032	0,0036	0,0012	0,0031	0,0011	0,0014	0,0036	0,0011	0,0012
$CRI (R_a)$	91	92	92	90	90	90	95	93	93
GAI	59	62	65	88	90	90	101	101	102
$Q_a (9.0.3)$	91	90	91	90	92	92	94	94	93
$Q_f (9.0.3)$	91	90	91	89	92	92	93	93	92
$Q_g (9.0.3)$	92	93	94	99	99	99	102	101	101
$Q_p (7.4)$	90	90	91	91	94	94	96	96	95
CRI2012	92	92	93	91	91	94	97	97	97
MCRI	89	89	89	91	91	91	90	90	90
R_f	87	87	88	86	86	87	94	94	93
R_g	93	93	94	98	97	97	101	101	101
GVI	80	81	81	91	89	89	92	90	90

* Duv: расстояние от точки на графике цветностей, соответствующей рассматриваемому объекту, до линии чёрного тела; CRI – общий индекс цветопередачи МКО [20]; GAI: Индекс площади цветовой гаммы (*Gamut Area Index*) [21], CQS (Q_a , Q_f , Q_p , Q_g): Шкала качества цвета [22], CRI2012: Модернизированный вариант CRI [50], MCRI: Запомненный индекс цветопередачи (*Memory Colour Rendering Index*) [51], R_f и R_g : Метрики, предложенные в *IESNA TM-30* [52], GVI: Индекс объёма цветовой гаммы (*Gamut Volume Index*) [19]

рофотометра *X-Rite SpectroEye*. Спектральные коэффициенты отражения этих матовых объектов и их координаты цветности в равноконтрастном цветовом пространстве *SAM16-UCS* [53] приведены, соответственно, на рис. 4 и 5. Следует отметить, что в этой работе мы не использовали естественные или привычные объекты (например, фрукты и овощи), так как в этом случае не удастся подобрать объекты одинаковой формы и размеров, но разного цвета. Ещё одна причина отказа от хорошо известных объектов связана с тем, что на сделанные наблюдателями оценки может повлиять их цветовая память [54]. Например, при оценке цвета яблока может оказаться так, что предпочтение будет отдано красному яблоку, тогда как синее яблоко восторга не вызовет.

В проведении исследований приняли участие двадцать наблюдателей, 10 мужчин и 10 женщин. Все они были студентами Уханьского университета возрастом от 17 лет до 21 года (средний возраст – 19, 1 лет). Все наблюдатели выдержали тест на дальтонизм Ишихары. До тестирования никто из них не знал о целях проводящихся исследований.

Для количественного выражения цветовых предпочтений использовалась 7-балльная оценочная шкала. Наблюдателей просили сделать оценки –3, –2, –1, 0, 1, 2 или 3, соответствующие оценкам «очень не нравится», «умеренно не нравится», «слегка не нравится», «безразлично», «слегка нравится», «умеренно нравится» и «очень нравится». При одном и том же уровне освещённости наблюдатели дважды оценивали выбранную комби-

нацию E и КЦТ; при этом наблюдатели не знали, какой уровень освещённости они воспринимали. Это было сделано для того, чтобы количественно определить внутреннюю вариативность каждого из наблюдателей.

2.3. Порядок проведения исследований

После прибытия, участников просили подписать согласие и пройти тест

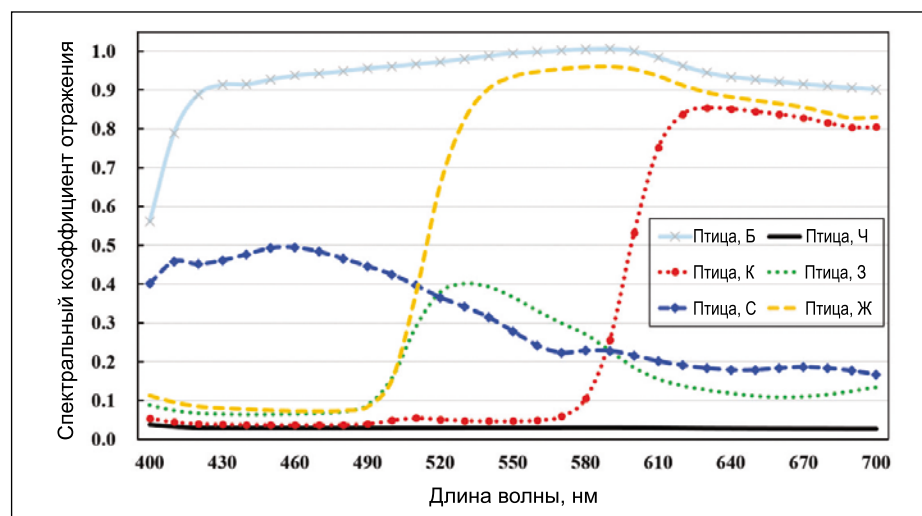


Рис. 4. Спектральные коэффициенты отражения экспериментальных объектов (искусственные птицы разного цвета)

Таблица 2

Среднеквадратичные отклонения оценок цветовых предпочтений для разных комбинаций E и КЦТ и разных цветов объектов

Объект	50 лк			200 лк			600 лк		
	3500 К	5000 К	6500 К	3500 К	5000 К	6500 К	3500 К	5000 К	6500 К
Птица, Ч	1,63	1,58	1,51	1,24	0,94	1,06	1,74	0,92	1,19
Птица, Б	1,33	1,18	1,12	1,72	0,98	0,97	1,44	1,05	1,41
Птица, К	1,52	1,16	1,20	1,69	1,09	1,44	1,53	1,36	1,79
Птица, Ж	1,39	1,11	1,16	1,50	1,09	1,28	1,69	1,23	1,53
Птица, С	1,22	1,37	1,30	1,06	0,80	1,02	1,26	0,99	1,37
Птица, З	1,13	1,19	1,34	1,39	1,03	0,99	1,49	1,10	1,44

Ишихары. Затем экспериментатор просил прошедших отбор наблюдателей надеть серые халаты, что исключало попадание на объекты цветных лучей, отражённых от цветной одежды наблюдателей.

Подведя наблюдателя к камере, экспериментатор просил его отрегулировать высоту стула таким образом, чтобы обеспечить невозможность наблюдения расположенного в камере осветительного модуля. Затем выключали общее освещение, так чтобы экспериментальное освещение оказалось единственным освещением тёмного в других отношениях помещения. Затем экспериментатор зачитывал наблюдателю инструкции и просил его озвучивать свою реакцию в ходе проведения исследований. Этот порядок был разработан для того, чтобы исключить влияние отражённого света на зрительную адаптацию наблюдателя, что могло бы иметь место, если бы наблюдатель должен был записывать свои ответы на белой бумаге.

Так как переадаптация от высокой освещённости к низкой занимает много времени, то при проведении этих исследований вначале оценивались источники света, обеспечивающие низкие уровни освещённости E (50 лк), после чего оценивались источники света, обеспечивающие средние (200 лк), а затем высокие (600 лк) уровни освещённости. В рамках подгруппы с постоянным значением E , различные значения КЦТ и цветные объекты выбирались случайным образом и уравнивались между наблюдателями. В самом начале каждому наблюдателю предоставлялась 1 мин для адаптации к первоначальному освещению, которое случайным обра-

зом выбиралось из вариантов, обеспечивающих освещённость 50 лк. Затем для ознакомления наблюдателя с процессом проведения оценок, проводилась тренировка с использованием случайно выбранной птицы.

После тренировки начинались непосредственно исследования с использованием подгруппы источников света, обеспечивающих освещённость 50 лк. При выбранной случайным образом КЦТ наблюдатель должен был сначала дать свою визуальную оценку цветовой предпочтительности применительно к пустой камере, а затем применительно к 6 цветным птицам (по одной, в случайной последовательности). При смене источника света наблюдатели должны были держать глаза закрытыми в течение примерно 30 с, что позволяло исключить влияние кратковременной памяти, в которой сохранялись предшествующие условия освещения. Это время «очистки памяти» было определено на основе результатов наших предшествующих исследований цветовых предпочтений, которые проводились при различных КЦТ [11, 13]. Затем наблюдатель должен был открыть глаза и в течение 1 мин смотреть на пустую освещённую камеру. После этой хроматической адаптации экспериментатор просил наблюдателя оценить его цветовое предпочтение применительно к освещённой камере, а затем и применительно к цветным птицам. На проведение каждой оценки наблюдателю предоставлялось столько времени, сколько ему требовалось.

После того, как наблюдатель заявлял об окончании процесса оценки (применительно к последней птице)

и подтверждал полученные результаты, условия освещения изменяли. При этом, после завершения всех исследований, проводившихся при постоянной освещённости, наблюдателю давалась 1 мин на «очистку памяти» (с закрытыми глазами) и 2 мин для полной адаптации к новому уровню освещённости пустой камеры. Затем описанный выше процесс проведения зрительных оценок повторялся для всех комбинаций E и КЦТ. На всю серию исследований у наблюдателя уходило примерно 100 мин.

3. Результаты и обсуждение

3.1. Изменчивость результатов, полученных одним и разными наблюдателями

Для количественной оценки изменчивости результатов, полученных разными наблюдателями, были рассчитаны среднеквадратичные отклонения сделанных ими оценок цветового предпочтения (табл. 2). Как следует из таблицы, среднеквадратичные отклонения, рассчитанные применительно к разным объектам, не противоречат друг другу. Эти результаты также согласуются с результатами нашего предыдущего исследования, проведённого в аналогичных условиях, в которых использовались эти же 7-балльные оценки [2, 11, 13, 14, 55].

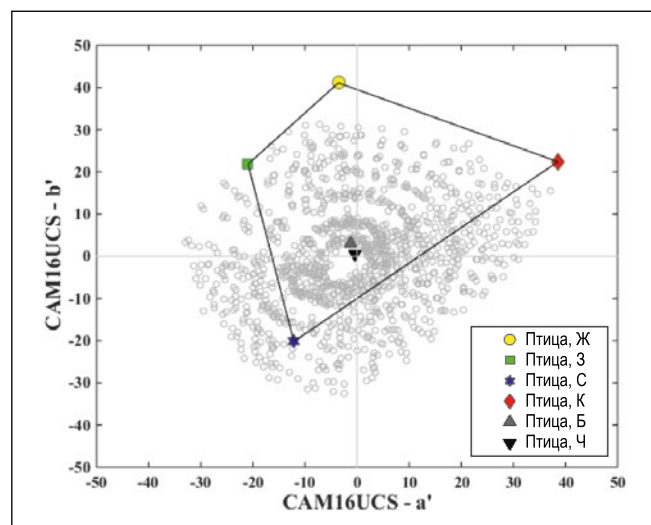
Количественная оценка изменчивости результатов, полученных одним наблюдателем, осуществлялась методом абсолютных разностей, который использовался в наших предшествующих работах [1, 2, 11, 13]. Как описано выше, в процессе проведения исследований наблюдатели должны были дважды оценить выбранную случайным образом комбинацию E и КЦТ (применительно к каждому объекту), о чём их не оповещали. Если абсолютная разность двух оценок превышала 2 (например, -3 в первый раз и 0 во второй раз), то эту пару оценок классифицировали как аномальные данные. Затем изменчивость результатов, полученных одним наблюдателем, описывалась отношением количества аномальных данных к общему количеству данных. В случае этого исследования среднее значение этого параметра было равно 9 %, что попадает в пределы диапазона средних значений, полученных в предыдущих исследованиях (3–17 %).

Было установлено, что изменчивость результатов, полученных одним наблюдателем в случае менее светлых объектов (чёрного, синего или зелёного (см. рис. 4)), составляла 15–20 % и была выше, чем в случае более светлых объектов (белого, красного и жёлтого), для которых изменчивость результатов, полученных одним наблюдателем, была гораздо ниже (0–5 %). Этот результат навёл нас на мысль ещё раз обратиться к нашему предыдущему исследованию цветовых предпочтений в случае джинсов, в котором предпочтения в части КЦТ рассматривались применительно к 7 парам джинсов с разным градиентами цвета [1]. Что интересно, в упомянутом исследовании было установлено, что в случае менее светлых джинсов также наблюдалась большая изменчивость результатов, полученных одним наблюдателем. Из этого следует, что на изменчивость результатов, полученных одним наблюдателем, возможно, влияет то, насколько светлым был объект наблюдения. Ещё один результат заключался в том, что изменчивость результатов, полученных одним наблюдателем, была также связана со степенью знакомства наблюдателя с объектом. В случае знакомых наблюдателя объектов эта величина была более низкой (джинсы: 4,8 и 6,2 % [1, 2]; фрукты и овощи: 3,3 % [1]; картина маслом с приморским пейзажем: 5,6 % [13]; чёрный и белый объекты: 6,7 % [1]), тогда как в случае незнакомых объектов она была более высокой (искусственные цветы: 16,6 % [13]; репродукция старинной фрески: 15 % [13]). Что касается изменчивости результатов, полученных разными наблюдателями, то влияние как того, насколько светлым был объект наблюдения, так и степени знакомства с этим объектом выявлено не было.

3.2. Общий анализ

Общие результаты данного исследования, которые приведены на рис. 6, позволяют утверждать, что при некоторых условиях действительно наблюдается тенденция к различию оценок, сделанных мужчинами и женщинами. Например, очевидно, что при освещённостях 200 и 600 лк женщины дают более высокие оценки, чем мужчины, тогда как при 50 лк результаты не столь очевидны. Если же рассмотреть оценки, данные при 5000

Рис. 5. Координаты цветности экспериментальных объектов (искусственные птицы разного цвета) в пространстве CAM16-UCS при 50 лк и 3500 К. Разбросанные серые точки соответствуют матовым цветовым образцам атласа цветов Манселла



и 6500 К, то оказывается, что женщины предпочитают 6500 К независимо от освещённости, тогда как в случае мужчин подобная тенденция не наблюдается. Поэтому представляется, что женщины больше нуждаются в сильном и более белом освещении, что справедливо по меньшей мере для рассматривавшихся в данной работе условий. Кроме того, так как согласно табл. 1 источники света, имеющие одинаковые КЦТ, имеют и схожие характеристики цветопередачи, то приведённые на рис. 6 данные иллюстрируют ещё и влияние освещённости при предпочтительном значении КЦТ.

Для рассмотрения влияния КЦТ, пола и цвета объекта на цветовые предпочтения, соответствующие каждому значению освещённости, был использован многофакторный дисперсионный анализ (*MANOVA*). Полученные результаты показали, что при 50 лк существенным является только влияние КЦТ ($F = 29,087, p < 0,001$), тогда как при 200 и 600 лк оценки цветовых предпочтений существенно зависят как от КЦТ (200 лк: $F = 54,697, p < 0,001$; 600 лк: $F = 31,653, p < 0,001$), так и от пола (200 лк: $F = 5,276, p < 0,05$; 600 лк: $F = 11,669, p < 0,05$). Помимо этого, проведённые впоследствии сравнительные исследования показали, что при 50 лк наблюдается существенное различие ($p < 0,05$) между любыми двумя из трёх КЦТ, тогда как при 200 и 600 лк существенное различие ($p < 0,05$) наблюдается только между 3500 К и как 5000 К, так и 6000 К. Эти результаты хорошо согласуются с результатами, приведёнными на рис. 6, и подтверждают наши прежние наблюдения. Кроме того, результаты этого анализа

не зависят сколь-нибудь существенным образом от цвета объекта при любом значении освещённости.

В то же время, следует отметить, что некоторые использовавшиеся в данной статье выражения, такие как «предпочтительная КЦТ» или «КЦТ влияет на цветовые предпочтения», теоретически нельзя считать точными, так как с точки зрения колориметрии одной и той же КЦТ соответствуют многочисленные спектральные распределения мощности излучения, и на восприятие цвета влияет ещё и цветопередача источников света, характеризующаяся соответствующими параметрами, которые приведены в табл. 1. Это не позволяет считать, что полученные в данной работе результаты остаются справедливыми во всех случаях.

Однако обратите, пожалуйста, внимание на то, что с точки зрения практического применения обсуждение этого вопроса представляется полезным по очевидной причине: КЦТ является одной из наиболее важных характеристик источника света, и неквалифицированным пользователям очень часто приходится делать выбор между источниками света с разными КЦТ и разными показателями цветопередачи. Фактически, согласно результатам проведённых недавних исследований «предпочтительных КЦТ» [1, 11, 13, 56–58], несмотря на то, что экспериментальные источники света, использовавшиеся при проведении этих исследований, имели разные показатели цветопередачи, наблюдатели в целом неизменно предпочитают КЦТ в диапазоне от 4500 до 5500 К, и им не нравится цветопередача, обеспечиваемая источниками света

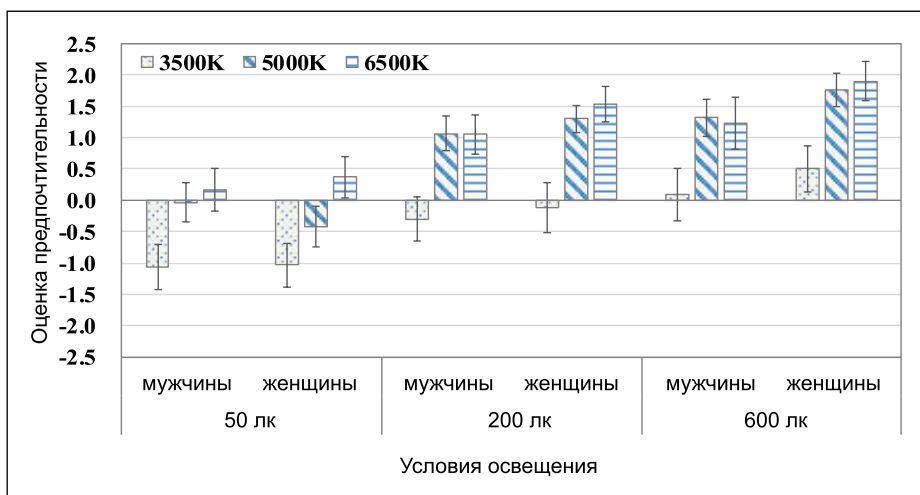


Рис. 6. Средние оценки предпочтительности цветов шести экспериментальных объектов (искусственные птицы разного цвета) для людей разного пола при разных комбинациях E и КЦТ. «Усы» обозначают 95 % доверительный интервал

с низкими (2500–3500 К) и высокими (превышающими 6000 К) значениями КЦТ. Такое постоянство несомненно подтверждает использовавшийся в данной работе подход к проведению исследований, и, на наш взгляд, его можно объяснить корреляцией между КЦТ и показателями цветопередачи источников света. То есть, несмотря на то, что КЦТ не оказывает непосредственного влияния на восприятие цвета, она чрезвычайно хорошо коррелирует с многими показателями цветопередачи [59], вследствие чего она оказывает некоторое или даже существенное «влияние» на восприятие цвета.

3.3. Гендерные различия при одной и той же комбинации E и КЦТ

На рис. 6 хорошо видно, что гендерные различия цветовых предпочтений зависят от комбинации E и КЦТ. Так что тот же самый основанный на *MANOVA* подход был применён к данным, полученным для всех комбинаций E и КЦТ. Полученные результаты говорят о том, что существенные гендерные различия ($p < 0,05$) наблюдались при комбинациях 200 лк + 6500 К, 600 лк + 5000 К и 600 лк + 6500 К, в то время как при других комбинациях E и КЦТ существенных различий не было. Кроме того, существенное влияние цветов объектов на цветовые предпочтения ($p < 0,05$) наблюдаются только в случае 200 лк + 6500 К, и проведённые впоследствии сравнительные исследования показали, что при этом оценки восприятия си-

ней птицы существенно ($p < 0,05$) отличаются от оценок восприятия чёрной, красной и зелёной птиц, и это же можно сказать о различии оценок восприятия белой и синей птиц ($p < 0,05$). Более того, хотя согласно результатам *MANOVA* при 50 лк + 6500 К объект оказывает незначительное влияние, проведённые впоследствии сравнительные исследования продемонстрировали существенное ($p < 0,05$) различие оценок восприятия как чёрной и синей птиц, так и красной и синей птиц. Несмотря на вышеупомянутые результаты, нет никаких других существенных факторов, которые влияют на оценки цветовых предпочтений при всех комбинациях E и КЦТ.

Сравнение вышеупомянутых результатов проведено на рис. 7, на котором продемонстрированы гендерные различия оценок предпочтительности для разных комбинаций E и КЦТ и разных цветов объектов. На рисунке, во-первых, видно, что для всех сценариев с одним и тем же значением E , зависимости оценок предпочтительности от КЦТ имеют один и тот же характер независимо от объекта (3500 К не считают предпочтительными, тогда как 5000 и 6500 К считают относительно привлекательными). Этот результат подтверждает сделанный нами ранее вывод о том, что на цветовые предпочтения доминирующее влияние оказывает именно КЦТ [13].

Как видно на рис. 7, в случаях 200 лк + 6500 К, 600 лк + 5000 К и 600 лк + 6500 К, сделанные мужчинами оценки птиц разных цветов оказались относительно разбросанными, тогда как сделанные женщинами оцен-

ки оказались относительно сконцентрированными. Это объясняет, почему *MANOVA* продемонстрировала существенные гендерные различия, о которых говорилось выше. Аналогичным образом, хотя *MANOVA* это и не подтвердила ($p > 0,05$), на рис. 7 также видно, что при низком значении КЦТ (3500 К) сделанные женщинами оценки оказались относительно разбросанными, тогда как сделанные мужчинами оценки оказались относительно сконцентрированными. Исходя из [34] и [60], мы полагаем, что эти результаты можно объяснить обусловленной процессом эволюции биологической долговременной адаптацией зрительной системы человека. То есть, согласно теории появления отличий между охотниками и собирателями, мужчины более приспособлены к жизни на открытом воздухе в дневных условиях с высокими КЦТ, тогда как женщины более приспособлены к жизни в домашних условиях с низкими КЦТ (например, при свете костра). Так что зрение мужчин биологически более адаптировано к высоким КЦТ, и их реакция на разные цвета оказывается разбросанной, тогда женщины более адаптированы к низким КЦТ и поэтому оказываются более чувствительными при оценке цветов именно в этих условиях.

3.4. Влияние цветов объектов

Как отмечалось выше, в условиях 50 лк + 6500 К оценки в случае синей птицы существенно отличаются от оценок в случаях чёрной и красной птиц. В условиях 200 лк + 6500 К то же самое наблюдалось при сравнении результатов, полученных в случае синей птицы, с результатами, полученными в случаях чёрной, красной и зелёной птиц, а также при сравнении результатов, полученных в случаях белой и красной птиц. На основании рис. 7 можно сделать вывод, что эти результаты в большой степени обусловлены оценками, данными мужчинами, что указывает на необходимость рассмотрения влияния цвета объекта при проводящихся нами исследованиях гендерных различий.

Для рассмотрения влияния гендерных различий на оценки цветовых предпочтений, проводящихся при заданной комбинации E и КЦТ и применительно к птице определённого цвета, был использован t -критерий Стью-

дента. Было установлено, что в случае 50 лк + 5000 К оценки, сделанные мужчинами и женщинами применительно к синей птице, существенно отличались друг от друга ($p < 0,05$), и на рис. 7 видно, что оценки, сделанные мужчинами, существенно выше оценок, сделанных женщинами. Аналогичный результат можно наблюдать и в случае 50 лк + 6500 К (для синей птицы), хотя он и не был статистически подтверждён t -критерием Стьюдента ($p = 0,094$). В то же время, было установлено, что в при 200 лк + 6500 К всё ещё наблюдаются существенные гендерные различия оценок красной птицы ($p < 0,05$), однако в этом случае сделанные женщинами оценки оказались выше. Фактически, подобные различия наблюдаются на рис. 7 и в случае 600 лк + 6500 К, но они не являются существенными с уровнем достоверности 10 % ($p = 0,115$). Несмотря на вышеупомянутые результаты, мы допускаем наличие гендерных различий и в других случаях (например, 200 лк + 6500 К + чёрная птица, $p = 0,063$; 600 лк + 3500 К + жёлтая птица, $p = 0,070$; 200 лк + 3500 К + зелёная птица, $p = 0,086$; 200 лк + 5000 К + зелёная птица, $p = 0,090$), которые отражены на рис. 7, но не удовлетворяют t -критерию Стьюдента ($0,05 < p < 0,1$). Эти предположения нуждаются в подтверждении, для чего потребуются дальнейшие исследования с большим количеством наблюдателей.

Кроме того, были рассмотрены различия в оценках, сделанных представителями одного пола применительно к объектам разного цвета. Рис. 7 и t -критерий Стьюдента говорят о наличии очень интересных результатов. А именно, при 600 лк + 3500 К оценки, данные женщинами в случае жёлтой птицы, существенно выше ($p < 0,01$) оценок, данных ими в случаях синей и чёрной птиц, тогда как при 50 лк + 6500 К оценки, данные мужчинами в случае синей птицы, симметрично существенно выше ($p < 0,05$) оценок, данных ими в случаях всех остальных птиц. Более того, в случае 50 лк + 5000 К мужчины явно предпочитают синюю птицу (по сравнению с красной и зелёной птицами, $p < 0,05$), а при 200 лк + 6500 К оценки, сделанные ими в случаях синей и белой птиц, существенно выше оценок, сделанных в случаях чёрной, красной и зелёной птиц ($p <$

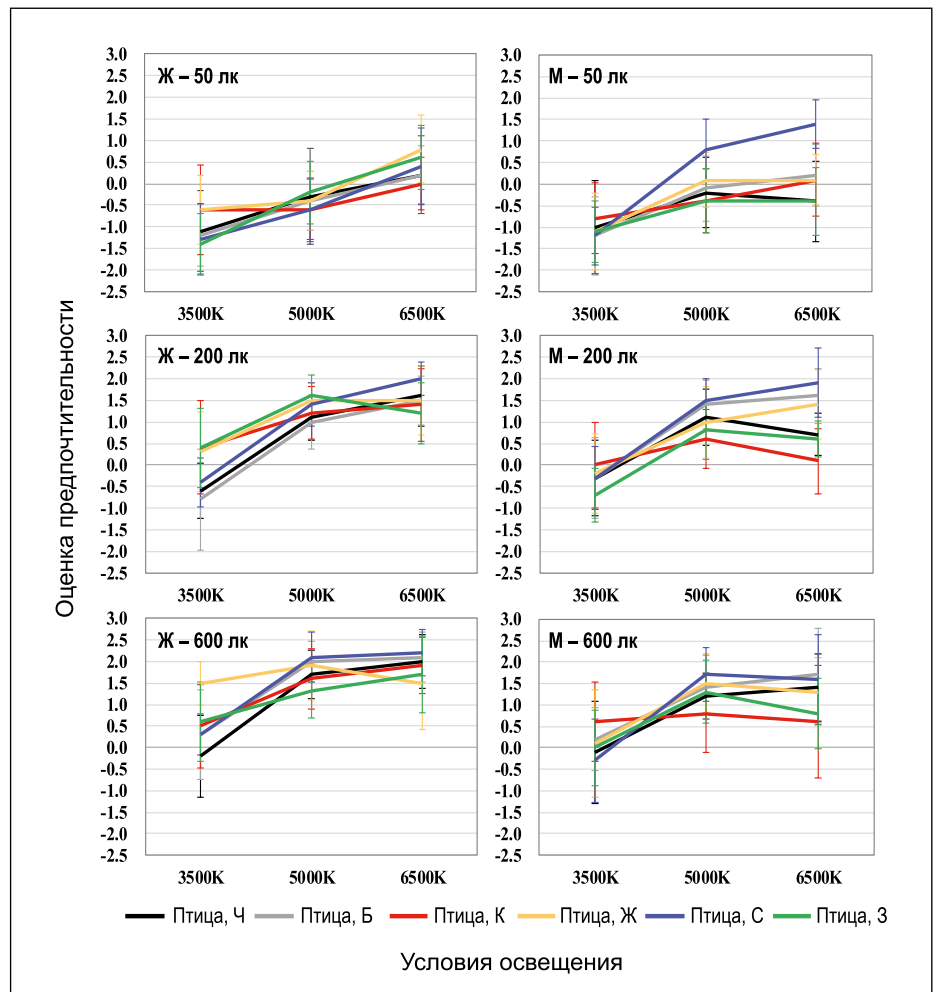


Рис. 7. Гендерные различия в оценках предпочтительности цветов для разных комбинаций E и КЦТ и разных цветов объектов. «Усы» обозначают 95 % доверительный интервал

0,05). Очевидно, что эти результаты отражают влияние цвета объекта на гендерные различия в случае предпочтительной комбинации E и КЦТ. При рассмотрении связанных с гендерными различиями вопросов следует учитывать и этот фактор.

4. Заключение

В данной работе применительно к шести одноцветным декоративным объектам, имеющим форму птиц, при трёх уровнях освещённости были определены предпочтительные значения КЦТ. Основным результатом этой работы можно считать подтверждение наличия гендерных различий при одной и той же комбинации E и КЦТ. Исходя из этих результатов, мы рекомендуем, чтобы при проведении дальнейших исследований количества участвующих в них мужчин и женщин были одинаковыми или, по меньшей мере, сопоставимыми, так как несбалансированное количество наблюдате-

лей мужского и женского пола может привести к смещению получаемых результатов, особенно в некоторых крайних случаях.

В то же время, во избежание неправильных выводов, следует отметить, что в этом предварительном исследовании учитывалась лишь небольшая часть параметров, характерных для большого многомерного мира. Дальнейшие исследования в этой области следует проводить с учётом многих воздействующих факторов, включающих в себя параметры, характеризующие цветопередачу источников света, культурные или региональные различия, диапазон значений освещённости и возможное разнообразие объектов исследований.

Эта работа финансировалась Китайским национальным фондом научных исследований (проект № 61505149) и проектом «Молодые таланты» г. Ухань, Китай (проект № 2016070204010111).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Huang, Z., Liu, Q., Pointer, M.R., Luo, M.R., Wu, B., Liu, A. White lighting and colour preference, part A: correlation analysis and metrics validation based on four groups of psychophysical studies // *Lighting Research & Technology*. – 2020. – Vol. 52, No. 1. – P. 5–22.

2. Huang, Z., Liu, Q., Liu, Y., Pointer, M.R., Luo, M.R., Wang, Q., Wu, B. Best lighting for jeans, Part 1: Optimizing colour preference and colour discrimination with multiple correlated colour temperatures // *Lighting Research & Technology*. – 2019. – Vol. 51, No. 8. – P. 1208–1223.

3. Khanh, T., Bodrogi, P., Guo, X., Anh, P.Q. Towards a user preference model for interior lighting Part 1: Concept of the user preference model and experimental method // *Lighting Research & Technology*. – 2019. – Vol. 51, No. 7, p. 147715351881646.

4. Khanh, T., Bodrogi, P., Vinh, Q., Stojanovic, D. Colour preference, naturalness, vividness and colour quality metrics, Part 1: Experiments in a room // *Lighting Research & Technology*. – 2017. – Vol. 49, No. 6. – P. 697–713.

5. Dangol, R., Islam, M. S., Hyvärinen, M., Bhusal, P., Puolakkka, M., Halonen, L. User acceptance studies for LED office lighting: Preference, naturalness and colourfulness // *Lighting Research & Technology*. – 2015. – Vol. 47, No. 1. – P. 36–53.

6. Dugar, A. M., Agarwal, D. A PILOT STUDY ASSESSING SHORT-TERM CHROMATIC ADAPTATION PREFERENCES FOR CORRELATED COLOUR TEMPERATURE IN INDIA // *Light & Engineering*. – 2019. – Vol. 27, No. 1. – P. 38–45

7. Дугар А.М., Агарвал Д. Предварительная оценка предпочтений жителей Индии в части коррелированной цветовой температуры при кратковременной хроматической адаптации. *Светотехника* // 2018. – № 4. – С. 26–32.

8. Ohno, Y., Fein, M., Miller, C. Vision experiment on chroma saturation for colour quality preference // *Light and Engineering*. – 2015. – Vol. 23, No. 4. – P. 6–14.

9. Миллер К., Оно Ё., Фейн М. Зрительный эксперимент по определению предпочтительной насыщенности цвета. *Светотехника* // 2015. – № 4. – С. 12–18.

10. Huang, Z., Liu, Q., Luo, M. R., Pointer, M. R., Wu, B., Liu, A. The whiteness of lighting and colour preference, Part 2: A meta-analysis of psychophysical data // *Lighting Research & Technology*. – 2019. – Vol. 52, No. 1. – P. 23–35.

11. Liu, Q., Huang, Z., Pointer, M. R., Luo, M. R., Xiao, K., Westland, S. Evaluating colour preference of lighting with an empty light booth // *Lighting Research & Technology*. – 2018. – Vol. 50, No. 8. – P. 1249–1256.

12. Jost-Boissard, S., Fontoynt, M., Blanc-Gonnet, J. Perceived lighting quality of LED sources for the presentation of fruit and vegetables // *Journal of Modern Optics*. – 2009. – Vol. 56, No. 13. – P. 1420–1432.

13. Huang, Z., Liu, Q., Westland, S., Pointer, M. R., Luo, M. R., Xiao, K. Light dominates colour preference when correlated colour temperature differs // *Lighting Research & Technology*. – 2018. – Vol. 50, No. 7. – P. 995–1012.

14. Tang, Y., Lu, D., Xun, Y., Liu, Q., Zhang, Y., Cao, G. In: The influence of individual color preference on LED lighting preference // 49th Conference of the International Circle of Education Institutes for Graphic Arts Technology and Management (IC) and 8th China Academic Conference on Printing and Packaging, 2017, May 14, 2017 – May 16, 2017, Beijing, China, Springer Verlag: Beijing, China, 2018, pp. 77–87.

15. Lin, Y., Wei, M., Smet, K., Tsukitani, A., Bodrogi, P., Khanh, T.Q. Colour preference varies with lighting application // *Lighting Research and Technology*. – 2017. – Vol. 49, No. 3. – P. 316–328.

16. Wei, M., Houser, K., David, A., Krames, M. Colour gamut size and shape influence colour preference // *Lighting Research & Technology*. – 2017. – Vol. 49, No. 8. – P. 992–1014.

17. Wei, M., Houser, K.W. What Is the Cause of Apparent Preference for Sources with Chromaticity below the Blackbody Locus? // *LEUKOS*. – 2016. – Vol. 12, No. 1–2. – P. 95–99.

18. Liu, A., Tuzikas, A., Zukauskas, A., Vaicekauskas, R., Vitta, P. I., Shur, M. Cultural preferences to color quality of illumination of different artwork objects revealed by a color rendition engine // *Photonics Journal, IEEE*. – 2013. – Vol. 5, No. 4. 6801010–6801010.

! Полный список литературы (60 пунктов) депонирован в редакции.



Чжэн Хуан (Zheng Huang), M. Eng. Окончил Уханьский университет. В настоящее время обучается в магистратуре Уханьского университета. Автор более 20 статей в журналах и докладов на конференциях. Область научных интересов: светотехника, колориметрия и наука о цвете



Цян Лю (Qiang Liu), Ph.D. Доцент Уханьского университета, член технического комитета Отделения 1 МКО. Автор более 60 публикация и 20 патентов в областях воспроизведения цвета и СД освещения. Область научных интересов: цвет, освещение и зрительное восприятие



цветовые предпочтения и различие цветов

Ин Лю (Ying Liu), B.S. Студентка Уханьского университета (с 2016 г.). Автор 6 статей в журналах и докладов на конференциях. Область научных интересов: качество цвета источников света с упором на



«Colour» (вышли четыре издания).

Майкл Р. Пойнтер (Michael R. Pointer), Ph.D. Внештатный профессор Лидского университета и технический советник Университета провинции Чжэнцзян, Ханчжоу, Китай. Соавтор книги «Measuring



светотехника, освещение в условиях сумеречного зрения, колориметрия, наука о цвете, зрительная оптимизация дисплеев и СД осветительных установок

Петер Бодроги (Peter Bodrogi), Ph.D., Dr. Sc. Окончил Университет им. Лорана Этвюша (Будапешт). Научный сотрудник Дармштадского технического университета. Область научных интересов:



технического университета. Председатель проводящихся в Дармштадте международных симпозиумов по автомобильному освещению (ISAL), член нескольких технических комитетов МКО. Автор целого ряда книг, научных публикаций и патентов в области светотехники. Область научных интересов: СД освещение

Тран Куок Кхан (Tran Quoc Khanh), Ph.D., Dr. Sc., профессор. Окончил технический университет Ильменау. Декан факультета электротехники и информационных технологий Дармштадского



ориентированное на человека освещение и прикладная оптика

Аньцин Лю (Anqing Liu), Ph.D. Научный сотрудник компании Chromatech Lighting Limited, Шэньчжэнь, Китай. Член технического комитета Отделения 1 МКО. Область научных интересов: цвет и отображение,

Реализуем светотехнические проекты любого уровня сложности



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



info@spb.svsrv.ru
svetoservis.ru



+7 (812) 448-57-19

Светлота в условиях дневного зрения: психофизическое моделирование посредством сигналов синечувствительных фоторецепторов сетчатки¹

П. БОДРОГИ, С. ГО, Т.К. КХАН

Светотехническая лаборатория Технического университета Дармштадта, Германия
E-mail: bodrogi@lichttechnik.tu-darmstadt.de

Аннотация

Был проведён наглядный психофизический эксперимент и исследовано восприятие светлоты большого однородного поля зрения (41°). Испытуемые оценивали светлоту двадцати световых стимулов разной цветности при двух уровнях яркости: $L_v = 267,6$ кд/м² и $L_v = 24,8$ кд/м². Полученные средние значения по субъективной шкале визуальной светлоты были смоделированы с помощью комбинации сигналов, генерируемых при возбуждении фоторецепторов: колбочек *S*-типа, палочек, светочувствительных ганглиозных клеток сетчатки (*ipRGCs*) и разности сигналов колбочек *L*-типа и *M*-типа. Новая величина – «относительное содержание синего в спектре» – также рассматривалась к моделированию. Эта величина была определена как «спектральная плотность энергетической яркости светового стимула, отнесённая к малому спектральному интервалу (380–520) нм в данном направлении в заданной точке». Модель «относительного содержания синего в спектре» может с достаточной точностью описывать субъективное восприятие светлоты наблюдателями.

Ключевые слова: субъективная светлота, восприятие светлоты, фотопическая модель светлоты, фоторецепторы, спектральное содержание синего цвета.

1. Введение

1.1. Яркость: определение и актуальность

Светлота (то есть субъективная светлота визуального стимула, воспринимаемого человеческим глазом) определяется в Международном светотехническом словаре Международной комиссии по освещению (*CIE ILV*) как «свойство зрительного восприятия, в соответствии с которым объект воспринимается как излучающий или отражающий больше или меньше света» [1]. Хотя светлота имеет «по меньшей мере три аспекта» [2], в данной статье рассматривается только так называемый аспект «пространственной светлоты» – восприятие «общего количества света, попадающего в глаза наблюдателя» [2]. Концепция «пространственной светлоты» важна во многих областях светотехники, включая проектирование освещения внутреннего пространства, в котором яркость должна быть достаточно высокой, чтобы «было легко видеть» [3], то есть для обеспечения хорошего зрительного восприятия. Пространственное распределение светлоты в помещении должно обеспечивать визуальный комфорт и хорошее (трёхмерное) восприятие пространства [3, 4]. При

наружном освещении с повышением уровня пространственной светлоты объекта наблюдения (местности), увеличивается и чувство безопасности [6] (что важно для пешеходов). Понятие пространственной светлоты относится к светлоте всей наблюдаемой местности, обладающей пространственной протяжённостью, а не к светлоте, создаваемой малоразмерными источниками света; или небольших отдельных объектов [5, 7].

1.2. Разница между «светлотой» и «яркостью»

В 1933 году Л.А. Джоунса назначили председателем Комитета по колориметрии Американского оптического общества (1922) и попросили огласить актуальную информацию о ходе выполнения работ. Впоследствии был опубликован предварительный отчёт, в котором был введён термин «яркость» [8]. После этого Джоунс написал [9], что комитет рекомендовал заменить слово «яркость» на «видимость». Комитет также постановил зарезервировать термин «светлота» в качестве названия сенсорной характеристики, связанной с фотометрической величиной, которой был присвоен термин «яркость». Позже было заявлено, что «фотометрия основана на неполном описании возможностей зрительной системы человека» [10], потому что функция $V(\lambda)$ (основная в фотометрии) и её производные величины (яркость, освещённость и т.д.) представляют собой линейную комбинацию только чувствительных к длинноволновому (*L*) и средневолновому (*M*) спектрам колбочковых фоторецепторов сетчатки глаза и не включают важные сигналы от чувствительных к коротковолновому спектру (*S*) колбочек, палочек и светочувствительных ганглиозных клеток сетчатки (*ipRGCs*).

Последние, так называемые «чувствительные к коротковолновому спектру», сигналы фоторецепторов вносят вклад в восприятие светлоты (в зависимости от уровня яркости) [11–17] вместе с сигналами двух хроматических (противоположных) каналов – (*L–M*) и (*L+M–S*) [13] Насыщенный цветовой стимул выглядит ярче, чем его ненасыщенный аналог той же яркости (это «отличие светлоты от яркости» или эффект Гельмгольца-Кольрауша) [18, 19]. Таким образом, суть светлоты не может быть описана только величиной «яркость». В приведённом выше описании под термином «сигнал» с математической точки зрения понимается взвешивание относительного спектра излучения источника света по спектральной чувствительности фоторецептора и интегрирование по длинам волн видимого диапазона.

¹ Перевод с англ. Т.В. Мешковой

1.3. Модели светлоты

В этом подразделе собраны и обобщены некоторые модели светлоты, имеющиеся в литературе, а также проведено сравнение с моделями, использованными в настоящей статье. Модели светлоты обычно объединяют значения вышеупомянутых сигналов сетчатки, включая два противоположных канала ($L-M$ и $L+M-S$) или их аппроксимации, основанные на значениях координат цвета стандартной колориметрической системы XYZ МКО. Модели светлоты также содержат аппроксимацию сигнала ($L+M$) (чаще всего используется яркость в условиях дневного зрения, L_v), представление палочкового сигнала (чаще всего используется яркость в условиях ночного зрения) и сигнала $ipRGC$ (сигнал светочувствительных ганглиозных клеток сетчатки), чтобы получить числовую величину предиктора для ощущения светлоты человеком. В некоторых моделях величина этого предиктора предназначена только для прогнозирования порядка ранжирования зрительных стимулов по восприятию их светлоты, не представляя численный аналог абсолютной величины воспринимаемой светлоты. Это так называемые модели эквивалентной яркости (L_{eq}). Выражение (1) показывает пример модели светлоты по Фотиосу и Левормору [20]:

$$L_{eq} = L_v \cdot (S/V)^{0,24}, \quad (1)$$

где S – сигнал вычисляется по данным чувствительности колбочек Смита и Покорны [21], а величина V (так называемый V -сигнал) получается путём взвешивания относительного спектрального распределения потока излучения источника света по функции $V(\lambda)$ в видимом диапазоне длин волн.

Другим примером модели светлоты является эквивалентная яркость L_{eq} по Вэйру и Коуну ($WCCF$) [22]. Эта модель базируется на стандартной колориметрической системе МКО, которая представлена в виде уравнений (2) и (3):

$$L_{eq} = (B/L) \cdot L_v, \quad (2)$$

где B/L является отношением светлоты к яркости, вычисляемое по координатам цветности стимула x, y по уравнению (3):

$$\lg(B/L) = 0,256 - 0,184y - 2,527xy + 4,656x^3y + 4,657xy^4. \quad (3)$$

Модель по Ри и др. (2011) [15] работает с взвешенной суммой двух сигналов – V -сигнала и S -сигнала. В модели Фотиоса и Левормора (1998) [13] воспринимаемая светлота рассматривается как сумма сигналов по трём каналам: ($L+M$), представленном с помощью $V(\lambda)$, и вышеупомянутых двух противоположных каналах. Модель Гута [23] основана на концепции векторной яркости, равной квадратному корню из суммы трёх квадратичных компонент: A (ахроматическая составляющая), T (первая хроматическая составляющая) и D (вторая хроматическая составляющая). Ягучи и Айкеда (1983) использовали модификацию модели Гута для объяснения нарушения спектральной аддитивности, которую они измерили в своих экспериментах по визуальному уравниванию светлот [24]. Модель

Кокошка – Бодман [25] вычисляет значение эквивалентной яркости для светлоты трёх координат цветности стандартной колориметрической системы МКО (X_{10}, Y_{10}, Z_{10}) и яркости в условиях ночного зрения (L').

В модели Ямакава и др. [47], полученной в результате субъективного эксперимента по оценке уровня светлоты, сигнал $ipRGC$ (меланопсинный сигнал) был объединён с освещённостью сетчатки, чтобы предсказать воспринимаемую светлоту метамерных белых стимулов (при фиксированных координатах цветности $x = 0,328$ и $y = 0,367$) при разных уровнях сигнала $ipRGC$ и яркости (от 22 кд/м² до 112 кд/м²). Эта модель представлена в виде уравнения:

$$R = 0,00484G^{1,1} + 2,31E^{0,48}, \quad (4)$$

где R – воспринимаемая светлота метамерных белых стимулов, G – меланопсинный сигнал, E – освещённость на сетчатке.

Так называемая модель светлоты B_2 Безенекера и Буллока [14] содержит взвешенную сумму трёх сигналов: V -сигнала, S -сигнала и сигнала $ipRGC$, отражающих тот факт, что «коротковолновое (<500 нм) излучение источника света усиливает восприятие пространственной светлоты в диапазоне от низкого до умеренного уровней яркости в условиях дневного зрения». Вдохновлённые этой идеей, авторы настоящей статьи намерены рассмотреть в качестве новой величины относительное спектральное содержание синего цвета в излучаемой энергии (далее – относительное спектральное содержание синего цвета). Эта величина обозначается $\Phi_{rel, blue}$, и определяется как спектральная плотность энергетической яркости $L_e(\lambda)$ стимула, отнесённая к малому спектральному интервалу (380–520 нм) в данном направлении в заданной точке L_v и определяется по формуле (5):

$$\Phi_{rel, blue} = [267,6 / L_v] \cdot \int_{380}^{520} L_e(\lambda) d\lambda. \quad (5)$$

Формула приведена относительно одного из двух уровней яркости, которые использовались в методике эксперимента настоящей статьи, а именно 267,6 кд/м².

Как упомянуто выше, $\Phi_{rel, blue}$ аналогична подходу Безенекера и Буллока [14] коротковолнового излучения (менее 500 нм), но мы используем 520 нм в качестве верхнего предела интеграла для того, чтобы немного больше перекрыть спектральную чувствительность палочкового фоторецептора (чтобы иметь возможность лучше учитывать возможный вклад палочек). В табл. 1 приведена классификация вышеупомянутых моделей светлоты по их типу.

1.4. Цели настоящей статьи

В настоящей статье будет описан визуальный эксперимент по моделированию светлоты. Эксперимент проводился при двух фиксированных уровнях яркости ($L_v = 267,6$ и 24,8 кд/м²) с 20 различными цветностями (различным содержанием сигнала фоторецептора) зрительного стимула на каждом уровне.

Результат будет моделироваться для следующих случаев:

1. комбинацией вышеупомянутых сигналов фоторецепторов сетчатки;

Аналитический обзор моделей светлоты, включая предложенную авторами настоящей статьи

Авторы	Тип модели	Сигналы или величины
Фотнус и Левермор [20]	Эквивалентная яркость	S, V, L_v
Вэйр и Коуэн (<i>WCCF</i>) [22]	Эквивалентная яркость	x, y, L_v
Ри и др. [15]	Взвешенная сумма сигналов	S, V
Фотнус и Левермор [13]	Взвешенная сумма каналов	$L+M,$ $L-M,$ $L+M-S$
Гут [23]	Взвешенная сумма каналов	A, T, D
Ягучи и Айкеда [24]	Взвешенная сумма каналов	A, T, D (изменённые)
Кокошка – Бодман [25]	Эквивалентная яркость	$X_{10}, Y_{10}, Z_{10}, L'$ (палочки)
Безенкер и Буллок [14]	Взвешенная сумма сигналов	$S, V, ipRGC$
Ямакава и др. [47]	Взвешенная сумма каналов	$E, ipRGC$
Бодроги, Го, Кхань	Относительное спектральное содержание синего цвета	$L_v, \Phi_{rel, blue}$

2. относительным спектральным содержанием синего цвета, как представление сигналов трёх типов фоторецепторов, чувствительных в коротковолновой части видимого излучения: S -колбочек, $ipRGCs$ и палочек.

Предметы исследования настоящей статьи:

1. Различимы ли вклады трёх фоторецепторов в коротковолновом диапазоне (S -колбочек, $ipRGCs$ и палочек) для начального восприятия отличия светлот друг от друга (а также выделения значения относительного спектрального содержания синего) на основе результатов визуального эксперимента по исследованию светлоты?

2. Велик ли вклад палочек в восприятие светлоты при двух уровнях яркости в эксперименте ($L_v = 267,6$ и $24,8$ кд/м²)?

3. Влияет ли противоположный сигнал ($L-M$) (разность сигналов L - и M -колбочек)?

4. Можно ли применять предложенную величину относительного спектрального содержания синего цвета (5) для

моделирования воспринимаемой светлоты в новой и существующей моделях?

Мы будем использовать комбинацию сигналов фоторецепторов и относительное спектральное содержание синего цвета для моделирования светлоты, т.е. для трактовки субъективных (определяемых наблюдателями) шкал визуальной светлоты (VBS , *visual brightness scales*), полученных в результате эксперимента настоящей статьи. Эти две гипотезы формулируются в уравнении комбинации сигналов (6) и в уравнении относительного спектрального содержания синего цвета (7), соответственно. Оптимальные параметры модели (весовые коэффициенты сигнала $A_S, A_{ipRGC}, A_R, A_{L-M}$ и показатель степени γ) будут рассчитываться на основе средних значений шкал ощущений светлоты наблюдателями. Величина $lg(L_v)$ включается для учёта влияния изменения общего уровня яркости зрительного стимула.

$$VBS \sim lg(L_v) \cdot [A_S (S_{rel})^\gamma + A_{ipRGC} (ipRGC_{rel})^\gamma + A_R (R_{rel})^\gamma + A_{L-M} (|L_{rel} - M_{rel}|)^\gamma] \quad (6)$$

$$VBS \sim lg(L_v) \cdot [(\Phi_{rel, blue})^\gamma] \quad (7)$$

В уравнениях (6) и (7), символ « \sim » означает, что количество слева должно быть объяснено количеством справа. Величина $|L_{rel} - M_{rel}|$ – это так называемый противоположный сигнал: разность относительного сигнала L -колбочек и относительного сигнала M -колбочек. Так называемые относительные значения сигнала $L_{rel}, M_{rel}, S_{rel}, R_{rel}$ и $ipRGC_{rel}$ в уравнении (6) были вычислены следующим образом:

1. спектральное распределение энергии (СПЭ) стимула было нормировано так, что его яркость составила $267,6$ кд/м²;

2. нормированное значение СПЭ было взвешено при относительной спектральной чувствительности определённого фоторецептора;

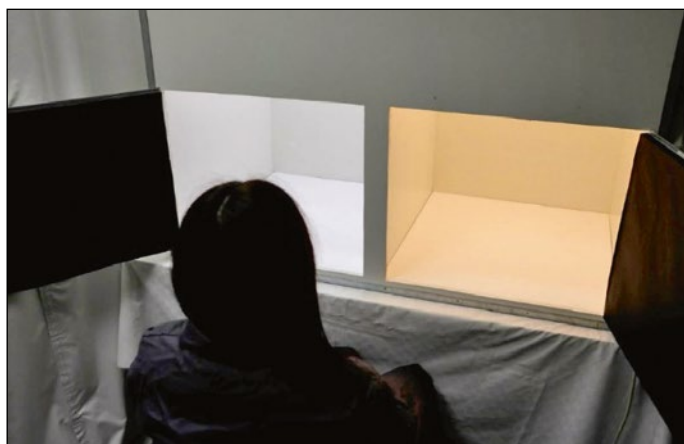


Рис. 1. Экспериментальная установка. Испытуемый сравнивал яркость в двух камерах экспериментального бокса, когда яркость двух камер была одинаковой, и при двух различных уровнях яркости $267,6$ и $24,8$ кд/м². Слева – эталонный стимул (второй серии)

3. далее был взят интеграл взвешенного значения СРЭ в диапазоне (380–780) нм.

Это вычисление показано в уравнениях (8) – (12). Для расчёта использовались спектральные чувствительности L -, M - и S -колбочек по Стокману и Шарпу (2000), $L(\lambda)$, $M(\lambda)$ и $S(\lambda)$, соответственно [27, 28]. Спектральная чувствительность светочувствительных ганглиозных клеток сетчатки ($ipRGC$), $ipRGC(\lambda)$ была вычислена в соответствии с [29, 30], в то время как относительная спектральная световая эффективность $V'(\lambda)$ для ночного зрения была применена для представления вклада палочковых фоторецепторов в восприятие светлоты.

$$L_{rel} = [267,6 / L_v] \cdot \int_{380}^{780} L_e(\lambda)L(\lambda)d\lambda \quad (8)$$

$$M_{rel} = [267,6 / L_v] \cdot \int_{380}^{780} L_e(\lambda)M(\lambda)d\lambda \quad (9)$$

$$S_{rel} = [267,6 / L_v] \cdot \int_{380}^{780} L_e(\lambda)S(\lambda)d\lambda \quad (10)$$

$$R_{rel} = [267,6 / L_v] \cdot \int_{380}^{780} L_e(\lambda)V'(\lambda)d\lambda \quad (11)$$

$$ipRGC_{rel} = [267,6 / L_v] \cdot \int_{380}^{780} L_e(\lambda)ipRGC(\lambda)d\lambda \quad (12)$$

Ещё одной целью настоящей работы является сравнение оптимальных значений показателя степени γ в уравнениях (6) и (7) при двух уровнях яркости 267,6 и 24,8 кд/м², и сравнить эти полученные значения с моделью Фотиуса и Левормора [20] ($\gamma = 0,24$). Другой вопрос, существенно ли различаются два показателя степени при двух уровнях яркости в настоящем эксперименте по светлоте. Таким образом, целью настоящей статьи является моделирование набора данных нового визуального эксперимента исследования светлоты с помощью предложенных уравнений (6) и (7).

2. Экспериментальный метод

Была использована так называемая процедура различения светлоты [31], в ходе которой испытуемым предлагалось сообщить, какая часть двухкамерного экспериментального бокса выглядит ярче (рис. 1). Испытуемые также должны были сказать, насколько он был ярче. Для этого они использовали следующую шкалу ощущений: 0 – почти одинаково яркая, почти нет видимой разницы в яркости; 1 – несколько ярче с очень маленькой разницей; 2 – несколько ярче; 3 – явно ярче; и 4 – явно ярче с большой разницей. Далее испытуемых инструктировали следующим образом: «Если вы говорите, например: «правая 2», это означает, что правая камера несколько ярче левой камеры. Если вы говорите «левая 4», это означает, что левая камера явно ярче, чем правая камера, и видна большая разница». Экспериментатор немедленно записывал каждый произнесённый ответ в электронную таблицу.

Испытуемые сидели в фиксированном положении перед экспериментальным боксом, экспериментатор контролировал положения наблюдателя. Испытуемые располагались по центру относительно экспериментального бокса, так чтобы глаза находились на расстоянии 20 см, при этом расстояние между глазами и серединой дна каждой

камеры равнялось 80 см. Ширина каждой камеры составляла 60 см (соответствует угловому размеру 41°), высота – 53 см, глубина – 67 см. Ширина разделительной стенки между двумя камерами равнялась 6 см (что соответствует угловому размеру 4°). Два источника света располагались в верхней части экспериментального бокса на высоте 72 см над верхними крышками двух камер. Такое расположение источников света позволило достичь однородного освещения нижней части камер. Однородность была увеличена за счёт дополнительной установки двух диффузных пластин (одна под источниками света, а другая на верхних крышках камер), таким образом неравномерность яркости в нижней части камер составила менее 3 %.

В эксперименте эталонный стимул был получен от светодиодного источника света с изменённым люминофором для фиксированного относительного спектрального распределения потока излучения при цветовой температуре 3991 К. Эталонный стимул появлялся либо справа (первая серия), либо слева (вторая серия), чтобы уравновесить возможное «смещение положения» [31]. Каждая из двух серий эксперимента проводилась дважды в двух отдельных случаях (называемых сессиями): первый со всеми стимулами при 267,6 кд/м² и второй со всеми стимулами при 24,8 кд/м², так что всего было проведено четыре сессии. В один день разрешалось провести и закончить только одну сессию, чтобы не было повторений. Испытуемым заранее сообщали, где находится эталон (слева или справа). Также дополнительно обозначали, что эталонный стимул не будет меняться в течение всего сеанса с двадцатью тестовыми стимулами.

Перед каждым сеансом проводилась тренировочная сессия, в ходе которой каждый из двадцати тестовых стимулов показывался в случайном порядке (по 10 с каждый) по сравнению с постоянным эталонным стимулом. Испытуемые не должны были отвечать на этапе обучения; они просто должны были рассмотреть возможный ответ. На тренировочной сессии в дополнение к двадцати тестовым стимулам в сочетании с эталонным стимулом трижды были показаны два якорных стимула. Один из них был явно ярче (330 и 33 кд/м² при двух уровнях яркости соответственно; при относительном спектральном распределении излучения стимула № 20 в таблице 2), а другой был явно темнее (49 и 5 кд/м²; при относительном спектральном распределении излучения стимула № 6 в таблице 2), чем эталонный стимул (с чётко определяемой визуальной разницей светлоты), и испытуемый был проинформирован об этом. Эти два якоря были показаны в начале сессии, затем после 10-го тестового стимула и в конце.

В основной части каждого сеанса, после 15 минут первоначальной адаптации к эталонному стимулу, испытуемый просматривал две камеры (эталонную и тестовую) в течение 40 с. Затем автоматический компьютерный звук произносил: «пожалуйста, оцените». После сигнала испытуемый должен был ответить в течение 20 с. До появления следующего тестового стимула нейтральный белый тёмный якорный стимул всегда отображался в течение 40 с, и автоматический звук сообщал об этом испытуемому. В течение каждого 40-секундного интервала испытуемому предлагалось сравнить светлоту двух стимулов следующим образом:

1. рассматривать только два дна камер экспериментального бокса, исключая вертикальные стенки;

Значения стимулов L_{rel} , M_{rel} , S_{rel} , $|L_{rel}-M_{rel}|$, S_{rel} , R_{rel} (палочек), $ipRGC$ и относительное спектральное содержание синего цвета ($\Phi_{rel, blue}$)

№	L_v (кд/м ²)	$ L_{rel}-M_{rel} $	L_{rel}	M_{rel}	S_{rel}	R_{rel}	$ipRGC_{rel}$	$\Phi_{rel, blue}$	Комментарии
1	268,2	0,001	0,386	0,387	0,024	0,345	0,211	0,188	Высокое содержание палочек
2	267,4	0,168	0,453	0,285	0,015	0,155	0,080	0,058	Высокое содержание $ L-M $
3	268,3	0,108	0,431	0,322	0,034	0,269	0,171	0,158	Высокое содержание палочек
4	267,7	0,088	0,440	0,352	0,331	0,525	0,586	0,740	Высокое содержание палочек и $ipRGC$
5	268,1	0,083	0,431	0,348	0,436	0,327	0,426	0,703	Высокое содержание S
6	266,8	0,168	0,454	0,286	0,048	0,167	0,109	0,100	Тёплый белый
7	266,8	0,033	0,413	0,380	0,343	0,476	0,512	0,652	Холодный белый
8	268,9	0,099	0,431	0,332	0,166	0,322	0,289	0,409	Нейтральный белый
9	268,4	0,101	0,433	0,332	0,144	0,292	0,268	0,307	Сбалансированные сигналы с высоким содержанием $ipRGC$
10	268,0	0,167	0,452	0,285	0,018	0,157	0,083	0,062	Высокое содержание $ L-M $
11	266,7	0,037	0,415	0,377	0,380	0,477	0,530	0,793	Холодный белый с более высокими локальными максимумами
12	267,6	0,101	0,429	0,328	0,122	0,294	0,226	0,233	Сбалансированные сигналы с более высоким содержанием палочек
13	267,1	0,042	0,426	0,384	0,831	0,538	0,767	1,164	Очень высокое содержание S
14	268,0	0,095	0,427	0,332	0,150	0,274	0,223	0,238	Сбалансированные сигналы с более высоким содержанием S
15	267,4	0,097	0,430	0,333	0,134	0,293	0,253	0,274	Нейтральный белый
16	268,0	0,101	0,431	0,330	0,131	0,281	0,237	0,250	Стимул нулевого положения
17	267,9	0,030	0,412	0,382	0,351	0,483	0,514	0,626	Высокое содержание $ipRGC$
18	267,1	0,168	0,455	0,287	0,051	0,206	0,143	0,142	Тёплый белый с более высокими локальными максимумами
19	267,3	0,159	0,459	0,300	0,327	0,300	0,338	0,414	Сбалансированные сигналы с более высоким содержанием S
20	266,8	0,069	0,422	0,352	0,194	0,362	0,338	0,381	Холодный белый
Ref.	270,3	0,100	0,431	0,331	0,133	0,282	0,239	0,252	Нейтральный белый (без оптимизации)

2. медленно перемещать голову между двумя камерами, глядя на два дна, не менее 2 с каждое.

Стимулы с сильным хроматическим содержанием (например, желтоватый в правой камере на рис. 1) вызывали остаточные изображения, но этот эффект был смягчён нейтральным белым тёмным якорным стимулом, отображаемым в течение 40 с между любыми последующими тестовыми стимулами. Роль этого повторяющегося тёмного якорного стимула состояла не только в том, чтобы очистить остаточные изображения, но и в том, чтобы перезагрузить процедуру распознавания светлоты испытуемым из явно более тёмного якоря.

Двадцать тестовых стимулов всегда показывались в случайном порядке, чтобы избежать так называемого «эффекта порядка» [31]. Они были сгенерированы 11-каналь-

ным светодиодной установкой при двух уровнях яркости: $(267,6 \pm 0,8)$ кд/м² или $(24,8 \pm 0,07)$ кд/м². Двадцать тестовых стимулов имели одинаковые относительные спектральные распределения потока излучения при обоих уровнях яркости. Это было обеспечено ахроматически передаваемым рисунком отверстий, расположенным под светодиодным источником света. Один из тестовых стимулов (№ 16; стимул нулевого условия) был оптимизирован таким образом, чтобы иметь аналогичные относительные спектральные распределения излучения сигналов $|L-M|$, S, палочек и $ipRGC$ по отношению к эталонному стимулу (табл. 2). Другие тестовые стимулы были разработаны (путём оптимизации управляющих значений 11 каналов) таким образом, чтобы иметь различные комбинации значений сигналов $|L-M|$, S, палочек и $ipRGC$, сохраняя по-

Средние значения и средние абсолютные значения отклонения оценок разности светлоты для всех наблюдателей

	Серия	Средняя оценка разности светлот				Среднее абсолютное отклонение по всем наблюдателям			
		1 ^я	2 ^я	1 ^я	2 ^я	1 ^я	2 ^я	1 ^я	2 ^я
No.	$\Phi_{rel, blue}$	267,6 кд/м ²	267,6 кд/м ²	24,8 кд/м ²	24,8 кд/м ²	267,6 кд/м ²	267,6 кд/м ²	24,8 кд/м ²	24,8 кд/м ²
13	1,164	3,0	3,5	3,0	2,5	1,0	0,5	1,0	1,5
11	0,793	2,0	2,0	3,0	2,0	1,0	1,0	1,0	1,5
4	0,74	3,0	3,0	3,0	2,0	1,0	1,0	1,0	1,0
5	0,703	3,0	2,0	2,0	1,0	1,0	2,0	1,0	1,0
7	0,652	2,0	2,0	2,0	2,0	1,0	1,5	1,0	1,0
17	0,626	2,0	2,0	2,0	3,0	1,0	1,0	1,0	1,0
19	0,414	3,0	2,0	2,0	1,0	1,0	2,0	1,0	2,5
8	0,409	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	0,5	1,0	0,0
20	0,381	2,0	1,0	2,0	2,0	1,0	1,5	1,0	1,0
9	0,307	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
15	0,274	-1,0	-1,0	0,0	0,0	0,0	0,5	0,0	0,5
16	0,25	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
14	0,238	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	0,0	0,0	1,0
12	0,233	-1,0	-1,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
1	0,188	2,0	0,0	2,0	-2,0	1,0	3,0	1,0	2,0
3	0,158	-1,0	-2,0	-1,0	-1,5	2,0	1,0	1,0	1,0
18	0,142	-1,0	-2,0	-1,0	-3,0	3,0	2,0	2,0	1,0
6	0,1	-2,0	-2,5	-1,0	-2,5	2,0	1,5	1,0	1,0
10	0,062	-1,0	-3,0	-1,0	-3,0	3,0	1,0	3,0	1,0
2	0,058	-2,0	-2,0	-1,0	-2,0	2,0	2,0	2,0	1,0
					Средне	1,0	1,0	1,0	1,0

стоянный уровень яркости. На рис. 2 показано относительное спектральное распределение потока излучения стимулов. В табл. 2 приведены значения стимулов L_{rel} , M_{rel} , S_{rel} , $|L_{rel}-M_{rel}|$, S_{rel} , R_{rel} (палочек) и $ipRGC$, полученные с помощью уравнений (8) – (12) и комментарии по оптимизации. Их относительное спектральное содержание синего цвета ($\Phi_{rel, blue}$) также приведено в таблице 2.

Что касается воспроизводимости двадцати различных спектральных распределений излучения с помощью светодиодной установки, то изменение яркости в течение 40-дневного экспериментального периода составило менее 1 %, изменение яркости эталонного источника света составило менее 1,5 %, изменение сигналов L_{rel} , M_{rel} , R_{rel} (палочек) и $ipRGC_{rel}$ составило менее 1,5 % (как для тестовых стимулов, так и для эталонных), изменение сигнала S_{rel} составило менее 2,3 % (как для тестовых стимулов, так и для эталонных).

В первой серии участвовало 25 участников (в возрасте от 21 до 47 лет, среднее значение: 26,9; 10 китайцев, 1 тайванец, 9 европейцев, 2 вьетнамца и 3ое с Ближнего

Востока) и во второй серии принял участие 21 испытуемый (в возрасте от 21 до 47 лет, среднее значение: 27,4; 10 китайцев, 1 тайванец, 7 европейцев, 1 вьетнамец и 2ое с Ближнего Востока), частично перекрывающих обе серии. Все испытуемые имели нормальное цветовое зрение, проверенное стандартными Псевдоизохроматическими пластинами на наличие приобретённых дефектов цветового зрения, Часть II [32] и ненасыщенной панелью d-15 [33].

3. Результаты, моделирование и обсуждение

В каждом сеансе для каждого из 20 тестовых стимулов регистрировались значения делений по шкале ощущений для каждого наблюдателя (то есть целое число от 0 до 4). Если эталон оказывался темнее (ярче) тестового стимула, то оценка этого тестового стимула присваивалась положительному (отрицательному) знаку. В табл. 3 приведены средние значения и средние абсолютные значения отклонения (разброс в оценках наблюдателей) в оценках светлоты для всех наблюдателей. 20 тестовых стимулов

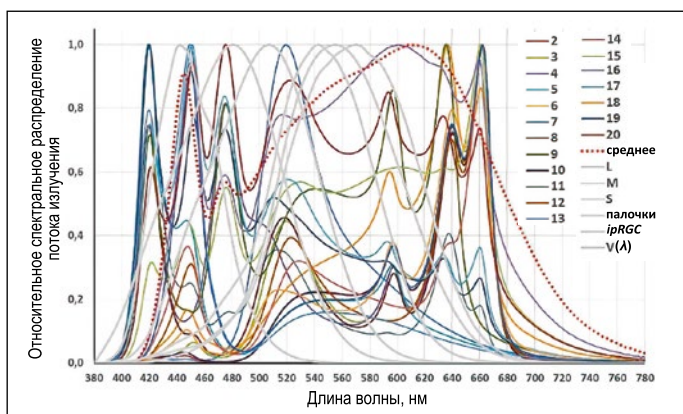


Рис. 2. Относительное спектральное распределение потока излучения 20 тестовых стимулов, эталонного стимула и относительные спектральные чувствительности колбочек типов *L*, *M*, *S*, палочек и *ipRGC*

(см. табл. 2 и рис. 2) повторно отсортированы в табл. 3 в соответствии с их относительным спектральным содержанием синего цвета ($\Phi_{rel, blue}$) в порядке убывания.

Как видно из последней строки табл. 3, среднее значение среднего абсолютного значения отклонения для всех участвующих наблюдателей всех тестовых стимулов равно 1 рейтинговой единице в каждой серии (1 и 2) и каждому уровню яркости (267,6 и 24,8 кд/м²). Единица оценки в этом случае – это характерное значение вариативности для межнациональной группы наблюдателей. На рис. 3 визуализируются средние значения шкалы светлоты, представленные в таблице 3.

Как видно из рис. 3, средние значения светлоты для всех наблюдателей, участвующих в данной серии, демонстрируют тенденцию к снижению с уменьшением относительного спектрального содержания синего цвета. Тестовый стимул № 13 с наибольшим относительным значением спектрального содержания синего цвета $\Phi_{rel, blue} = 1,164$ оказался самым ярким. В целом, последние пять тестовых стимулов в табл. 3 (№ 3, 18, 6, 10 и 2), имеющие наименьшее относительное спектральное содержание синего цвета ($\Phi_{rel, blue} < 0,16$), оказались самыми тёмными. Коэффициент корреляции Спирмена между средними значениями оценок разности светлоты при двух уровнях яркости составил 0,944 в первой и 0,916 во второй серии эксперимента. Оба значения коэффициента корреляции были значимыми (*T*-тест; $p < 0,0001$). Это означает, что результаты при двух уровнях яркости демонстрируют сходные тенденции при оценке светлоты для всех 20 тестовых стимулов. Корреляция между значениями светлот в двух сериях эксперимента также высокая: коэффициент корреляции Спирмена составил 0,911 (при 267,6 кд/м²) и 0,838 (при 24,8 кд/м²), причём оба коэффициента были значимыми (*T*-тест; $p < 0,0001$). Этот вывод позволяет объединить результаты двух серий эксперимента.

Чтобы построить модель светлоты, очень важно проанализировать тенденции оценки отдельных наблюдателей, чтобы исключить наблюдателей с противоречащими тенденциями оценок перед моделированием. Для этого был рассчитан коэффициент ранговой корреляции Спирмена между значением сигнала тестового стимула (табл. 2) и значениями оценки светлоты каждого наблюдателя в отдельности. Минимальные, максимальные и сред-

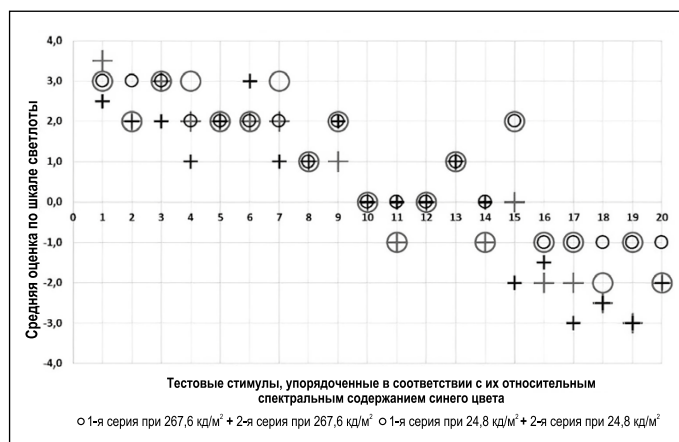


Рис. 3. Средняя оценка по шкале светлоты в зависимости от тестовых стимулов, которые упорядочены в соответствии с их относительным спектральным содержанием синего цвета в порядке убывания по абсциссе

ние значения этих коэффициентов ранговой корреляции для всех испытуемых приведены в табл. 4.

Как видно из табл. 4, существует положительная корреляция в среднем между оценками светлоты и сигналами всех трёх коротковолновых фоторецепторов (*ipRGC*, *S*, *R*), а также $\Phi_{rel, blue}$, но корреляция с сигналом $[L-M]$ в среднем отрицательна. Рассматривая максимальные и минимальные значения коэффициентов корреляции, можно видеть, что некоторые наблюдатели противоречат основной тенденции восприятия большей светлоты с повышенным спектральным содержанием синего при равной яркости. В рамках настоящей статьи мы решили использовать для моделирования экспериментальные данные только тех наблюдателей (большинство), которые следуют основной тенденции. Аналогичные выводы об индивидуальных различиях восприятия светлоты были также найдены в литературе, что обозначалось выше. В настоящей статье мы используем следующий математический критерий для включения результата конкретного наблюдателя в моделирование светлоты: значение коэффициента ранговой корреляции с относительным спектральным содержанием синего $\Phi_{rel, blue}$ этого наблюдателя должно было быть больше 0,2 в каждом из четырёх сеансов.

Восемнадцать из 25 наблюдателей (72 %) были включены в моделирование согласно 1-й серии эксперимента и четырнадцать из 21 наблюдателя (67 %) были включены в моделирование согласно 2-й серии эксперимента. Оценки светлоты выбранных наблюдателей (18 наблюдателей + 14 наблюдателей = 32 случая) были унифицированы по следующим положениям. Нулевое положение стимула дало в случае последних наблюдателей для обеих серий и обеих уровней яркости нулевые средние оценки. В первой серии эксперимента при 267,6 кд/м² были получены исключительно нулевые оценки в случае нулевого стимула (т.е. наблюдатели отмечали эталонную светлоту), во второй серии была только одна оценка (-1), а все остальные равнялись 0. При этом для уровня яркости 24,8 кд/м² были получены только две оценки (-1); и одна (+1) в первой серии и три (-1) оценки и одна (+1) оценка. *U*-тест Манна-Уитни не выявил достоверного отличия тенденции любого из четырёх наборов нулевых условий от нуля ($p < 0,01$). Мы сравнили наборы данных 1-й серии и 2-й серии также

Коэффициенты ранговой корреляции Спирмена между значениями сигнала фоторецептора тестовых стимулов и значениями оценки светлоты для каждого наблюдателя и каждого экспериментального сеанса

Сессия							
Серия	Уровень яркости, кд/м ²		$ipRGC_{rel}$	S_{rel}	R_{rel}	$ L_{rel}-M_{rel} $	$\Phi_{rel, blue}$
1	267,6	Мин.	-0,10	-0,06	-0,05	-0,78	-0,11
1	267,6	Макс.	0,94	0,90	0,91	0,22	0,95
1	267,6	Ср.	0,49	0,49	0,50	-0,43	0,50
1	24,8	Мин.	-0,16	-0,19	-0,04	-0,85	-0,19
1	24,8	Макс.	0,95	0,91	0,92	0,09	0,94
1	24,8	Ср.	0,56	0,53	0,59	-0,52	0,56
2	267,6	Мин.	-0,50	-0,36	-0,40	-0,85	-0,45
2	267,6	Макс.	0,87	0,89	0,88	0,24	0,88
2	267,6	Ср.	0,50	0,50	0,48	-0,42	0,50
2	24,8	Мин.	-0,20	-0,17	-0,22	-0,76	-0,21
2	24,8	Макс.	0,89	0,87	0,87	0,34	0,88
2	24,8	Ср.	0,59	0,57	0,57	-0,50	0,58

в случае других 19 стимулов (табл. 2; по одному отдельно) в дополнение к нулевому положению стимула при обоих уровнях яркости. U -тест Манна-Уитни не выявил достоверного различия между тенденциями 1-й серии и 2-й серии для любого стимула ($p < 0,05$), что подтверждает отсутствие значимого смещения позиции (то есть различий только потому, что наблюдение за эталонным стимулом происходило либо с левой, либо с правой стороны).

Полученные два унифицированных набора данных (при двух уровнях яркости) состояли из $18+14=32$ (случаев) $\times 20$ (тестовые стимулы) = 640 оценок светлоты (целые числа от -4 до 4). Из этих двух наборов данных были вычислены две непрерывные шкалы светлоты (так называемые шкалы Терстона [34]) для 20 спектров (см. табл. 2 и рис. 2) при двух уровнях яркости. Эти значения шкалы Терстона 2×20 , т.е. шкалы визуальной оценки светлоты (VBS), изображены на рис. 4 как функция величины $\Phi_{rel, blue}$ вместе с точками данных моделирования в соответствии с формулой (7) с оптимальными значениями степени γ для обоих уровней яркости и промежуточной модели светлоты (на основе объединённого набора данных).

Как видно из рис. 4, оптимальные значения показателей степени γ в соответствии с формулой (7) равны 0,194 (при 24,8 кд/м²) и 0,668 (при 267,6 кд/м²). При этих двух оптимальных показателях степени значение коэффициента корреляции Пирсона (r) между значениями, полученными по уравнению (7) и шкалой визуальной оценки светлоты равнялось 0,925 ($r^2 = 0,856$) и 0,924 ($r^2 = 0,853$) соответственно. Оптимизируя показатель для объединённого набора данных при обоих уровнях яркости, промежуточное значение показателя $\gamma = 0,399$ получилось со следующими значениями коэффициента корреляции: $r = 0,921$ ($r^2 = 0,848$) для 24,8 кд/м² и $r = 0,918$ ($r^2 = 0,843$) для 267,6 кд/м² соответственно. С показателем степени согласно модели Фотиуса и Левормора [20] ($\gamma = 0,24$) мы получаем $r = 0,925$

при 24,8 кд/м² и $r = 0,909$ при 267,6 кд/м². Эти коэффициенты корреляции существенно не отличаются [35] от ранее указанных значений ни при оптимальных значениях степени, ни при промежуточном значении $\gamma = 0,399$ ($p > 0,78$). Если мы используем (B/L) из уравнений (2) и (3), мы получаем $r = 0,711$ для 24,8 кд/м² ($p = 0,04$; значительно меньше, чем при использовании уравнения (7) при $\gamma = 0,399$) и $r = 0,815$ для 267,6 кд/м² ($p = 0,21$; не значительно меньше, чем согласно уравнению (7) с $\gamma = 0,399$). На рис. 5 показана зависимость величины r^2 от степени γ .

Как видно из рис. 5, зависимость r^2 от γ достаточно ровная; разница между коэффициентами корреляции, соответствующими промежуточному значению показателя ($\gamma = 0,399$) и конкретному значению показателя ($\gamma = 0,194$

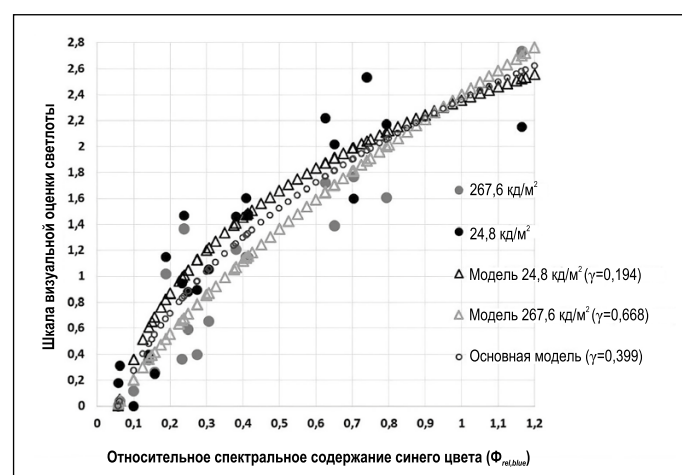


Рис. 4. Значения шкалы визуальной оценки светлоты (шкалы Терстона) для 20 источников света при двух исследуемых уровнях яркости (267,6 и 24,8 кд/м²) в зависимости от относительного спектрального содержания синего цвета ($\Phi_{rel, blue}$) источника света

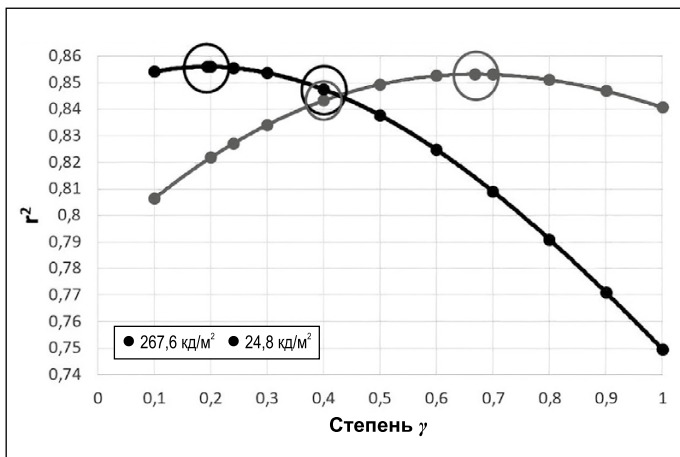


Рис. 5. Зависимость величины коэффициента корреляции Пирсона в квадрате (r^2) для светлоты (при 24,8 и 267,6 кд/м²) и прогнозируемой величины степени по формуле (7), кружками выделены оптимальные парные значения r^2 и γ

при 24,8 кд/м² или $\gamma = 0,668$ при 267,6 кд/м²), не была существенной ($p > 0,9$) [35]. Поэтому казалось разумным использовать усреднённое значение степени ($\gamma = 0,399$) при обоих уровнях яркости в уравнении (7).

Рассмотрим более подробно уравнение (6) для комбинации сигналов. Во-первых, коэффициент A_{L-M} был установлен равным нулю, поскольку коэффициент корреляции с сигналом $|L-M|$ был отрицательным, по крайней мере, в пределах вышеупомянутой основной группы наблюдателей, которые рассматривались для моделирования в настоящей статье. Роль сигнала $|L-M|$ далее анализируется в разделе 4. Коэффициент корреляции между значениями шкалы визуальной оценки светлоты и прогнозируемых значений по уравнению (6) был максимизирован путём оптимизации значений γ , A_S , A_{ipRGC} и A_R при двух уровнях яркости отдельно. Оптимизация также проводилась путём установки некоторых параметров нулевыми из набора $\{A_S, A_{ipRGC}, A_R\}$ и оптимизации только остальных параметров. Результаты приведены в табл. 5.

Как видно из таблицы 5, полученные значения коэффициента корреляции не сильно отличаются. Критерий значимости [35] не выявил достоверной разницы между коэффициентами корреляции ($p > 0,14$ при 24,8 кд/м² и $p > 0,38$ для 267,6 кд/м²). На следующем этапе для прогнозирования результатов с помощью простейшей возможной модели рассматривался автономный сигнал $ipRGC$ с средним значением степени ($\gamma = 0,399$) относительного спектрального содержания синего цвета ($\Phi_{rel, blue}$) модели уравнения (7). Коэффициенты корреляции с $\gamma = 0,399$ были не достоверно меньше ($p > 0,85$), чем при оптимальных значениях показателя в 5-м столбце таблицы 5 ($r = 0,922$ вместо $r = 0,931$ при 267,6 кд/м² и $r = 0,938$ вместо $r = 0,939$ при 24,8 кд/м²). Эти коэффициенты корреляции также не значительно больше, чем у модели $\Phi_{rel, blue}$ с $\gamma = 0,399$. Значит, что, основываясь на нынешних результатах шкалы визуальной оценки светлоты, мы не можем различать три фоторецептора в коротковолновом диапазоне и не можем сказать, можно ли пренебречь вкладом палочек. Во всяком случае, оптимальные коэффициенты палочек были больше при 24,8 кд/м², чем при 267,6 кд/м² по сравнению с величиной коэффициентов S-колбочек и $ipRGC$. Это указывает на прямое влияние палочек при

24,8 кд/м². При этом считаем, что камеры в экспериментальном боксе были достаточно большими ($2 \times 41^\circ$), чтобы покрыть большую область сетчатки, включая область с наибольшей плотностью палочек.

Согласно приведённому выше анализу, величина M предлагается в качестве результирующей модели светлоты настоящей статьи (13). Формула (13) содержит среднее значение степени $\gamma = 0,399$.

$$M = \lg(L_v) \cdot \Phi_{rel, blue}^{0,399} \quad (13)$$

4. Общее обсуждение

Предложенная формулировка (13), содержащая относительное спектральное содержание синего цвета и логарифмическую яркость стимула, способна предсказать результат оценки визуальной светлоты с разумной точностью, т.е. с $r = 0,921$ и $r = 0,918$ при 24,8 и 267,6 кд/м² соответственно. В эксперименте стимулом был свет от источников света (табл. 2), отражённый от белого однородного дна смотровых камер (рис. 1), и моделирование проводилось на основе этого стимула. Этот белый стимул можно рассматривать как рабочую точку зрительной системы в момент оценки светлоты. Эта белая точка определяла эффективность каждого нейронного механизма, который вносит свой вклад в воспринимаемую светлоту.

Важным ограничением настоящего исследования является то, что описание зависимости яркости от светлоты $\lg(L_v)$ (13) является гипотетическим, потому что уровни яркости были фиксированными. Несколько моделей светлоты (1) и (2) имеют линейную зависимость от яркости и утверждают (согласно концепции эквивалентной яркости), что предсказывают только то, является ли один стимул ярче другого, и не утверждают, что предсказывают абсолютную воспринимаемую величину светлоты. Выражение $\lg(L_v)$ (вместо L_v) представляет собой один из возможных способов описания сжатия сигнала яркости в зрительной системе человека с целью предсказания абсолютной величины восприятия светлоты, а не только порядка различных стимулов в зависимости от их светлоты.

Ещё одним ограничением настоящих результатов стало то, что была смоделирована лишь часть ответов. Хотя она и включает в себя большинство наблюдателей (около 70%), остальные наблюдатели не следовали тенденциям предложенной модели (13): либо они не имели корреляции ни с одним из сигналов, либо имели низкую корреляцию с сигналом $|L-M|$. Действительно, в исследовании восприятия светлоты наблюдатели могут быть сгруппированы в зависимости от того, меняется ли их восприятие светлоты в зависимости от относительного спектрального состава излучения при одинаковой яркости [16]. Другие авторы также обнаружили существенную межнациональную вариативность восприятия светлоты [36–39] и указали, что существует по меньшей мере два основных типа наблюдателей в соответствии с их восприятием светлоты: преимущественно хроматический тип (имеющий большую хроматическую чувствительность во всем видимом диапазоне длин волн) и преимущественно ахроматический тип (имеющий приблизительно чувствительность канала яркости, предсказываемого $V(\lambda)$).

Рис. 5 в работе Айкеда и др. [36] показывает, что вариация наблюдателей между этими двумя основными типа-

Оптимальные значения параметров по уравнению (6) и коэффициенты корреляции Пирсона между значениями шкалы визуальной оценки светлоты и прогнозируемых значений по уравнению (6) после оптимизации

Уровень яркости (кд/м ²)		$S, ipRGC,$ палочки, γ	$S, ipRGC, \gamma$	$ipRGC, \gamma$	S, γ	Палочки, γ	$S,$ палочки, γ	$ipRGC,$ палочки, γ
267,6	γ	0,869	0,845	0,848	0,644	1,337	0,875	0,856
267,6	A_S	0,342	0,003	0	1,000	0	0,652	0
267,6	A_{ipRGC}	1,876	0,376	1,000	0	0	0	1,790
267,6	A_R	0,728	0	0	0	1,000	1,333	0,066
267,6	r	0,932	0,931	0,931	0,880	0,893	0,930	0,931
267,6	r^2	0,868	0,867	0,867	0,775	0,797	0,865	0,867
24,8	γ	0,314	0,259	0,259	0,246	0,560	0,314	0,352
24,8	A_S	0,634	0	0	1,000	0	0,285	0
24,8	A_{ipRGC}	0,000*	2,000	1,000	0	0	0	0,920
24,8	A_R	3,430	0	0	0	1,000	1,543	1,084
24,8	r	0,947	0,939	0,939	0,863	0,934	0,947	0,945
24,8	r^2	0,897	0,882	0,882	0,745	0,873	0,897	0,894

ми непрерывна, то есть существуют «сильные», «средние» и «слабые» хроматические типы. Рис. 3 и 4 в работе Айкеда и др. [36] выявили ещё два варианта: хроматический вариант с меньшей чувствительностью к синему цвету, чем основной хроматический тип, и ахроматический вариант с ещё меньшей чувствительностью к синему и красному цвету, чем предсказывал канал яркости. Физиологическая причина может заключаться в том, что хроматический наблюдатель имеет больший вклад в воспринимаемую светлоту от хроматических каналов зрительной системы, чем ахроматический наблюдатель. Другой причиной большой межнациональной вариативности восприятия светлоты может быть различие психологических установок испытуемых в ходе эксперимента по различению светлоты: ахроматические наблюдатели склонны мысленно изолировать хроматическую составляющую светлоты и не реагируют на неё.

Ещё один вопрос заключается в том, применимы ли результаты настоящего эксперимента к реальной сцене, поскольку сравнивались только однородные поля. Предыдущие исследования показали, что присутствие окрашенных объектов или поверхностей в наблюдаемом поле существенно не влияет на результаты испытаний по уравнению [40]. Однако если в поле зрения находился пространственно протяжённый высоко хроматический массив Мондриана, то оценка светлоты отличалась от ахроматической среды [41]. Возможно, сильно хроматические изображения с очень насыщенными красными и оранжевыми поверхностями вызывают очень сильные красно-зеленые противоположные сигналы ($L-M$), которые вносят вклад в их светлоту, и это не может быть описано такими пространственными моделями светлоты, которые не содержат зависимости от ($L-M$) сигнала. В уравнении (6), при ненулевом значении коэффициента A_{L-M} , а также в моде-

ли Фотиуса и Левермора [13], оба хроматических канала ($L-M$ и $|L+M-S|$) активны так, что при увеличении сигналов обоих каналов светлоты увеличивается. Если в сцене есть (несколько пространственно протяжённых) красных и/или оранжевых объектов, то мы получим более высокие значения сигналов $|L-M|$ в поле зрения, и тогда, в свою очередь, вклад канала $|L-M|$ в общее пространственное восприятие светлоты сцены может стать более явным.

При объединении сигналов фоторецепторов для прогнозирования пространственной светлоты мы использовали автономный сигнал S вместо $|L+M-S|$ со следующим математическим обоснованием. Спектральная функция чувствительности сигнала $|L+M-S|$ спектрально перекрывается со спектральной чувствительностью как $|L-M|$, так и яркостью ($L+M$), и в целом это мешает успешной оптимизации параметров в уравнении (6). Заметим, что в настоящем эксперименте со светлотой значение ($L+M$) было приблизительно постоянным, поскольку яркость была постоянной. Во время оптимизации 20 мульти-светодиодных спектров сигнал яркости ($L+M$) был представлен источником света с угловым размером 2° фотопической яркости (в единицах кд/м²) для современных применений (поскольку это обычное определение яркости сегодня наиболее широко используется). Мы не рассматривали альтернативные представления [42] сигнала канала яркости.

Что касается времени адаптации в эксперименте со светлотой, то испытуемым давали 15 минут на адаптацию к эталону на текущем уровне яркости (267,6 или 24,8 кд/м²). После этого уровень яркости не изменялся в течение сеанса, и у испытуемого было 40 с, в течение которых устанавливалась смешанная адаптация между тестовой цветностью и эталонной цветностью путём медленного взгляда (т.е. по крайней мере в течение 2 с в каждой камере) назад и вперед между тестовой и эталонной

камерами. L -, M -, S -колбочковые фоторецепторы хроматической адаптации имеют период полураспада всего 40–70 мс. [43], так что пребывание 2 с в каждой камере обеспечивало достаточное время для стабилизации сигналов хроматического колбочкового фоторецептора и, следовательно, для визуальной оценки наблюдателями изменения светлоты между двумя камерами. Канал $ipRGC$, обладает более длительным временем адаптации (около 100–200 с, см. рис. 3 в [44]), так что нам, безусловно, нужен более длительный период наблюдения, чем в настоящем эксперименте, чтобы получить значительный вклад $ipRGC$ в воспринимаемую светлоту. На практике испытуемые обычно проводят несколько часов в одной и той же визуальной среде, например в офисе или гостиной. Поэтому в качестве валидации необходимы исследования поля светлоты в реалистичных условиях просмотра.

Предложенные формулировки (6) и (7) настоящей статьи увеличивают гипотетическую зависимость светлоты от яркости [$lg(L_v)$] благодаря учёту сигналов синечувствительных фоторецепторов ($\Phi_{rel, blue}$ для ≤ 520 нм) или комбинации сигналов S_{rel} , $ipRGC_{rel}$ и R_{rel} . Зависимость точности моделирования от показателя степени была достаточно низкой γ (см. рис. 5), причём наиболее вероятные значения показателя находились в диапазоне от 0,15 до 0,50 (в соответствии с предыдущими моделями), а в модели (13) было принято среднее значение показателя 0,399. Альтернативная гипотеза моделирования может заключаться в том, что зависимость шкалы визуальной оценки светлоты от яркости не должна мультипликативно масштабироваться, вместо этого она аддитивно модифицируется сжатыми и комбинированными относительными сигналами S -, $ipRGC$ и палочковых фоторецепторов (14):

$$VBS = lg(L_v) + A \cdot lg[A_S(S_{rel})^\gamma + A_{ipRGC}(ipRGC_{rel})^\gamma + A_R(R_{rel})^\gamma] \quad (14)$$

Модель (14) «сжимает» комбинацию сигналов с помощью второй функции lg . Ни аддитивная концепция, ни двойное сжатие не дали полезных результатов при моделировании. Поэтому мы предлагаем в дальнейших исследованиях использовать модель (13). Преимущество формулировки (13) заключается в том, что её легко использовать в современной светотехнической практике. Для репрезентативного набора из 302 спектральных составов широко используемых сегодня источников света (включая светодиодные лампы и светильники, компактные и трубчатые люминесцентные лампы и лампы накаливания) относительное спектральное содержание синего ($\Phi_{rel, blue}$) может быть аппроксимировано с разумной точностью ($r^2 = 0,91$) от 2° стандартной координаты цветности y в соответствии с формулой (15).

$$\Phi_{rel, blue} = -2,4174 \cdot y + 1,1405 \quad (15)$$

Практическая значимость настоящей модели светлоты заключается в том, что пространственное светлотное восприятие реальных сцен (например, улицы или построенного интерьера) очень важно для применения в области внутреннего и наружного освещения. В наружном освещении более высокое значение восприятия светлоты связано с повышением уровня безопасности [6] и увеличе-

нием скорости обнаружения препятствий. При внутреннем освещении повышение уровня светлоты в помещении способствует увеличению производительности труда [45]. Важно отметить, что для применения в архитектуре и при светотехническом моделировании, что мы не можем описать пространственное восприятие светлоты только стандартной фотометрией, то есть количеством яркости (L_v , в единицах кд/м²) [11–17]. Следовательно, мы должны предложить практически осуществимый способ описания светлоты, основанный на фундаментальных психофизических исследованиях. В наиболее типичной повседневной ситуации у специалиста по освещению есть инструмент, и этот инструмент может измерять яркость и координаты цветности МКО 1931 (x , y). Уравнения (13) и (15) обеспечивают достаточное для использования приближенные светлоты, основанное на настоящем экспериментальном наборе данных.

Действительно, если специалист по освещению измерит некоторые характерные значения яркости (L_v) и координаты цветности y в поле зрения (например, в середине стены в комнате), то на основании них можно рассчитать характерное значение светлоты, которое теперь зависит не только от яркости, но и от спектра в более коротковолновом диапазоне, согласно настоящим экспериментальным результатам. Таким образом, практическая значимость настоящего исследования заключается в том, что мы предоставляем светотехникам, инженерам и дизайнерам простую в использовании формулировку (13) путём замены на (15). Новая формулировка позволит оценить восприятие пространственной светлоты сцены в реальных условиях. Для этого нам не нужен сложный аппарат: достаточно ручного колориметрического устройства, которое позволяет измерять L_v и y в характерной точке, чтобы получить характерное значение пространственной светлоты в данной сцене. Мы также можем использовать освещённость (E_v в lx) вместо яркости (т.е. заменить L_v на E_v) и вычислить значение на основе освещённости. Чтобы измерить E_v и y , нам просто нужен ручной колориметр типа освещённости с хорошо охарактеризованной сенсорной головкой.

Наконец, мы хотели бы дополнительно обсудить, в каком смысле используется термин «пространственная светлота», и обозначить его отличительные особенности. Наша цель состоит в том, чтобы получить значение пространственного восприятия светлоты сцены для лучшей видимости небольших структур, текстур и цветовых оттенков на поверхностях объектов и лучшего восприятия внешнего вида среды (например, комнаты) для внутреннего освещения. Этот параметр является основополагающим в дизайне для моделирования и проектирования освещения. Если мы увеличим средний уровень яркости сцены (например, от 0,3 до 3,0 кд/м² при уличном освещении или от 30 до 300 кд/м² при внутреннем освещении), то, независимо от пространственной структуры сцены общее восприятие светлоты пространственно-расширенной сцены (так называемой «пространственной светлоты») будет увеличиваться. Как уже упоминалось во введении, светлота в этом смысле зависит не только от яркости, но и от цветности, особенно от «коротковолнового содержания» спектра источника света. Освещение пространственно-протяженной сцены с более высокой коррелированной цветовой температурой (более высоким

содержанием коротких длин волн) приводит к более высокому значению воспринимаемой пространственной светлоты [5, 12, 13, 17, 20, 41].

Настоящая статья посвящена только этой, так называемой, «пространственной светлоте». Здесь мы не рассматриваем восприятие света некоторых пространственно-ограниченных объектов внутри сцены. Чтобы прояснить это утверждение, посмотрите на лист белой бумаги (с несколькими маленькими, сложными символами, написанными очень тонкими линиями и, например, маленьким изображением красной клубники, напечатанным на нём) в хорошо освещённой комнате под светильником. Бумага будет выглядеть белой. Если мы возьмём этот лист в той же комнате в тени, например, шкафа, бумага продолжит выглядеть белой, хотя её яркость становится намного ниже. Но разобраться в символах будет сложнее, и красная клубника станет менее яркой, потому что зрительная система получает меньше абсолютного количества света и больше не работает в идеальной рабочей точке. Если, в свою очередь, мы снизим световой поток всех светильников в комнате, то впечатление от всей комнаты станет тусклым и неприятным, потому что общая пространственная светлота в комнате станет низкой, независимо от светлоты неизолированного цвета отдельных объектов. Наблюдателям, входящим в эту комнату, не понравится её внешний вид, потому что пространственные (цветовые) структуры на поверхностях объектов имеют тенденцию исчезать: например, детальная структура лиц и волос наблюдателей, сидящих в комнате, обычно становится менее заметной. Пространственная светлота, воспринимаемая в комнате, уменьшается. Этот эффект не зависит от структуры сцены и не зависит от воспринимаемой светлоты отдельных объектов в комнате, а также от одновременных контрастов между этими объектами. В настоящей статье рассматривается только пространственная светлота в указанном выше смысле.

5. Выводы

В визуальном эксперименте исследовалось восприятие светлоты большого однородного поля (41°). Одна камера двухкамерного экспериментального бокса освещалась 20 световыми стимулами разной цветности при 2 различных уровнях яркости. В другой камере находился эталонный источник света. Испытуемые должны были сравнить восприятие светлоты от тестового и эталонного стимулов при равной яркости. Для моделирования средней субъективной шкалы визуального восприятия светлоты используются значения сигналов различных фоторецепторов (S -колбочки, палочки, $ipRGCs$ и сигнал $|L-M|$ (6)) и относительное спектральное содержание синего цвета ($\Phi_{rel, blue}$, спектральное излучение стимула для длин волн ≤ 520 нм относительно его яркости (7)). Наша гипотеза состояла в том, что светлота зависит от логарифма яркости, который умножается на любой ($\Phi_{rel, blue}$) в соответствии с (7) или комбинацию взвешенных и сжатых сигналов фоторецепторов в соответствии с (6).

Исходя из психофизических результатов, из модели был исключён противоположный сигнал ($L-M$) ($A_{L-M} = 0$). Точность моделирования автономных сигналов S -колбочек, палочек и $ipRGCs$, а также их комбинаций в зависимости от различных весов в (6) существенно не отличались друг

от друга, а также существенно не отличались от точности моделирования относительного спектрального содержания синего цвета модели (7). Как следствие, на основании полученных результатов нельзя было решить, можно ли пренебречь вкладом палочек в двух экспериментах. Следует отметить, что в эксперименте по исследованию светлоты оптимальные значения степени палочек были больше при $24,8$ кд/м², чем при $267,6$ кд/м² по сравнению со значением S -колбочек и $ipRGC$. Это подразумевает возможное влияние палочек в случае наблюдения большого однородного поля при проведении эксперимента по исследованию светлоты при $24,8$ кд/м².

Величина M (13) может описать усреднённую тенденцию поведения шкалы визуального восприятия светлоты с разумной точностью. Формула (13) легко реализуется в практическом применении в современной светотехнике, потому что, кроме яркости, используется только количественное относительное спектральное содержание синего цвета ($\Phi_{rel, blue}$), и это может быть легко аппроксимировано из координаты цветности u в соответствии с (15).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ:

1. Commission Internationale de l'Éclairage. e-ILV. Available from <http://eilv.cie.co.at/>, 2014.
2. Rea MS. The what and the where of vision lighting research. // *Lighting Research and Technology* 2018; 50: 14–37.
3. Stiles WS. The Eye, Brightness and Illuminating Engineering. // *Transactions of the Illuminating Engineering Society* 1952; 17: 241–264.
4. Robinson W. Brightness Engineering. A.M.I.E.E. // *Transactions of the Illuminating Engineering Society* 1951; 16: 61–85.
5. Fotios SA, Cheal C. Predicting lamp spectrum effects at mesopic levels. Part 1: Spatial brightness. // *Lighting Research and Technology* 2011; 43:143–157.
6. Rea MS, Bullough JD, Brons JA. Parking lot lighting based upon predictions of scene brightness and personal safety. // *Lighting Research and Technology* 2015; 49: 293–304.
7. Fotios S, Atli D. Comparing Judgments of Visual Clarity and Spatial, Brightness through an Analysis of Studies Using the Category Rating Procedure. // *LEUKOS*2012; 8: 261–281.
8. Jones LA. Colorimetry: Preliminary Draft of a Report on Nomenclature and Definitions. // *Journal of the Optical Society of America* 1937; 27: 207–211.
9. Optical Society of America, Committee on Colorimetry. *The Science of Color*. New York, USA: Crowell, 1953.
10. Boyce P. Editorial: The paradox of photometry. // *Lighting Research and Technology* 2015; 47: 767.
11. Berman SM, Jewett DL, Fein G, Saika G, Ashford F. Photopic luminance does not always predict perceived room brightness. // *Lighting Research and Technology* 1990; 22: 37–41.
12. Fotios SA. Lamp colour properties and apparent brightness: a review. // *Transactions of the Illuminating Engineering Society* 2001; 33: 163–178.
13. Fotios SA, Levermore GJ. Chromatic effect on apparent brightness in interior spaces III: Chromatic brightness model. // *International Journal of Lighting Research and Technology* 1998; 30: 107–110.
14. Besencker UC, Bullough JD. Investigating visual mechanisms underlying scene brightness. // *Lighting Research and Technology* 2016; 49: 16–32.
15. Rea MS, Radetsky LC. Toward a model of outdoor lighting scene brightness. // *Lighting Research and Technology* 2011; 43: 7–30.

16. *Vidovszky-Németh A, Schanda J.* White light brightness–luminance relationship. // *Lighting Research and Technology* 2012; 44: 55–68.

17. *Fotios S, Levermore GJ.* Perception of electric light sources of different colour properties. // *International Journal of Lighting Research and Technology* 1997; 29: 161–171.

18. *Nayatani Y.* A colorimetric explanation of the Helmholtz–Kohlrausch effect. // *Color Research and Application* 1998; 23: 374–378.

19. *Burns SA, Smith VC, Pokorny J, Elsner AE.* Brightness of equal-luminance lights. // *Journal of the Optical Society of America* 1982; 72: 1225–1231.

20. *Fotios SA, Levermore GJ.* Chromatic effect on apparent brightness in interior spaces, II: SWS lumens model. // *Lighting Research and Technology* 1998; 30: 103–106.

21. *Smith VC, J. Pokorny J.* Spectral sensitivity of the foveal cone photopigments between 400 and 500 nm. // *Vision Research* 1975; 15: 161–171.

22. Commission Internationale de l'Éclairage. Publ. CIE118–1995. // *CIE Collection in Colour and Vision* 118/2, 1995. Models of heterochromatic brightness matching.

23. *Guth SL, Massof RW, Benzschawel T.* Vector model for normal and dichromatic color vision. // *Journal of the Optical Society of America* 1980; 70: 197–212.

24. *Yaguchi H, Ikeda M.* Subadditivity and superadditivity in heterochromatic brightness matching. // *Vision Research* 1983; 23: 1711–1718.

25. *Kokoschka S, Bodmann HW.* Ein konsistentes System zur photometrischen Strahlungsbewertung im gesamten Adaptationsbereich. // In: *Proceedings of the CIE18th Session, London, 1975.*

27. *Stockman A, Sharpe LT.* Spectral sensitivities of the middle- and long-wavelength sensitive cones derived from measurements in observers of known genotype. // *Vision Research* 2000; 40: 1711–1737.

28. *Stockman A, Sharpe LT, Fach CC.* The spectral sensitivity of the human short-wavelength cones. // *Vision Research* 1999; 39: 2901–2927.

29. *Rea MS, Figueiro MG, Bierman A, Bullough JD.* Circadian light. // *Journal of Circadian Rhythms* 2010; 8: 1–10.

30. *Dacey DM, Liao HW, Peterson BB, Robinson FR, Smith VC, Pokorny J, Yau KW, Gamlin PD.* Melanopsin-expressing ganglion cells in primate retina signal color and irradiance and project to the LGN. // *Nature* 2005; 433: 749–754.

31. Commission Internationale de l'Éclairage. Publ. // *CIE212–2014. Guidance towards Best Practice in Psychophysical Procedures Used when Measuring Relative Spatial Brightness, 2014.*

32. *Ichikawa H, Tanabe S, Hukami K.* Standard Pseudoisochromatic Plates for Acquired Color Vision Defects, Part II. // *Tokyo, Japan: Igaku-Shoin Medical Publishers, 1983.*

33. *Lanthyony P.* The desaturated panel d-15. // *Documenta Ophthalmologica* 1978; 46: 185–189.

34. *Costa M, Gaddi C.* Color Name Distances Scaled by Thurstone's Ranking Order Psychophysical Method. *Journal of Vision* 2016; 16: 824.

35. *Fisher RA.* On the Probable Error of a Coefficient of Correlation Deduced from a Small Sample. // *Metron* 1921; 1: 3–32.

36. *Ikeda M, Ikeda J, Ayama M.* Specification of individual variation in luminous efficiency for brightness. // *Color Research and Application* 1992; 17: 31–44.

37. *Kimura-Minoda T, Kojima Sh, Fujita Y, Ayama M.* Study on Glare of LED lamp and Individual Variations of Brightness Perception. // In: *Proceedings of the ISAL 7th International Symposium on Automotive Lighting, 2007.*

38. *Nayatani Y, Sobagaki H.* Causes of individual differences on brightness/luminance (B/L) ratios. // *Journal of Light and Visual Environment* 2003; 27: 30–34.

39. *Yaguchi H, Kawada A, Shioiri S, Miyake Y.* Individual differences of the contribution of chromatic channels to brightness. // *Journal of the Optical Society of America* 1993; 10: 1373–1379.

40. *Fotios SA, Cheal C.* Brightness matching with visual fields of different types. // *Lighting Research and Technology* 2010; 43: 73–85.

41. *Fotios S, Atli D, Cheal C, Hara N.* Lamp spectrum and spatial brightness at photopic levels: Investigating prediction using S/P ratio and gamut area. // *Lighting Research and Technology* 2014; 47: 595–612.

42. *Sharpe LT, Stockman A, Jagla W, Jägle H.* A luminous efficiency function, $V^*(\lambda)$, for daylight adaptation. // *Journal of Vision* 2005; 5: 948–968.

43. *Rinner O, Gegenfurtner KR.* Time course of chromatic adaptation for color appearance and discrimination. // *Vision Research* 2000; 40: 1813–1826.

44. *Wong KY, Dunn FA, Berson DM.* Photoreceptor Adaptation in Intrinsically Photosensitive Retinal Ganglion Cells. // *Neuron* 2005; 48:1001–1010.

45. *Rea MS.* The Trotter Paterson Lecture 2012: Whatever happened to visual performance?. // *Lighting Research and Technology* 2012; 44: 95–108.

46. *Land EH, McCann JJ.* Lightness and Retinex Theory. // *Journal of the Optical Society of America* 1971; 61: 1–11.

47. *Yamakawa M, Tsujimura S, Okajima K.* A quantitative analysis of the contribution of melanopsin to brightness perception. // *Scientific Reports* 2019; 9:7568, <https://doi.org/10.1038/s41598-019-44035-3>.



Петер Бодрози (Peter Bodrogi), Ph. D., Dr. Sc. Окончил Университет им. Лорана Этвюша (Будапешт). Научный сотрудник Дармштадского технического университета. Область научных интересов: светотехника, освещение в условиях сумеречного зрения, колориметрия, наука о цвете, зрительная оптимизация дисплеев и СД осветительных установок



Сюэ Го (Xue Guo), M. Sc. С 2016 года по 2018 год работала научным сотрудником в Светотехнической лаборатории Технического университета Дармштадта, Германия. В настоящее время работает в компании TÜV SÜD Product Service GmbH в качестве продакт-специалиста по светильникам и светотехническим измерениям



Тран Куок Хан (Tran Quoc Khanh), Ph. D., Dr. Sc., профессор. Окончил технический университет Ильменау. Декан факультета электротехники и информационных технологий Дармштадтского технического университета. Председатель проводящихся в Дармштадте международных симпозиумов по автомобильному освещению (ISAL), член нескольких технических комитетов МКО. Автор целого ряда книг, научных публикаций и патентов в области светотехники. Область научных интересов: СД освещение

Применение механизма рекомбинации Шокли-Нойса-Саа для модели вольт-амперной характеристики светодиодных структур с квантовыми ямами

Ф.И. МАНЯХИН*, А.Б. ВАТТАНА, Л.О. МОКРЕЦОВА

НИТУ «МИСиС», Москва

* E-mail: zaomisis@yandex.ru

Аннотация

Теория рекомбинации в области пространственного заряда Шокли-Нойса-Саа (ШНС) применена для построения математической модели вольт-амперной характеристики (ВАХ) светодиодов с квантовыми ямами. В отличие от математической модели ВАХ по ШНС в предлагаемой модели принимаются неоднородность распределения центров рекомбинации по области пространственного заряда и зависимость их средней концентрации от напряжения, а также то, что фактор неидеальности зависимости прямого тока от напряжения смещения может принимать непрерывный ряд значений от 1 до 5 и определяется зависимостью от напряжения смещения как тока насыщения, так и показателя экспоненты математической модели ВАХ.

Ключевые слова: светодиоды с квантовыми ямами, вольт-амперная характеристика, фактор неидеальности, механизм рекомбинации.

Введение

Светодиоды (СД) на основе гетероструктур с квантовыми ямами (КЯ) в силу своих замечательных свойств заняли одни из ведущих положений как источники света и элементы полноцветных экранов. Но парадокс состоит в том, что за 25 лет с начала их серийного производства не создана математическая модель их вольт-амперной характеристики (ВАХ). Для описания экспериментально наблюдаемых ВАХ СД с КЯ используют модели, разработанные для гомо- $p-n$ -переходов. При этом возникают сложности как в интерпретации поведения зависимости тока от напряжения смещения, так и – квантовой эффективности СД.

Модель ВАХ диффузионного механизма тока была предложена Шокли [1]:

$$J_{\text{dif}} = q \left(\frac{p_n L_p}{\tau_p} + \frac{n_p L_n}{\tau_n} \right) \cdot \left[\exp\left(\frac{qU}{kT}\right) - 1 \right] = J_0 \left[\exp\left(\frac{qU}{kT}\right) - 1 \right], \quad (1)$$

где J_{dif} – плотность тока, q – заряд электрона, p_n и n_p – концентрации неосновных носителей заряда в n - и p -областях соответственно, L_n и L_p – диффузионные длины, τ_n и τ_p – времена жизни электронов и дырок, U – напряжение смещения, k – постоянная Больцмана, T – абсолютная температура $p-n$ -перехода, $J_0 = q \left(\frac{p_n L_p}{\tau_p} + \frac{n_p L_n}{\tau_n} \right)$ – плотность

диффузионного тока насыщения.

Впоследствии в формулу (1) был введён параметр n , полученный из эксперимента и названный фактором не-

идеальности (ФН) (в других работах – фактором идеальности):

$$J_{\text{dif}} = J_0 \cdot \left[\exp\left(\frac{qU}{nkT}\right) - 1 \right]. \quad (2)$$

Физическая природа ФН для $p-n$ -структур с гомопереходами была раскрыта в работе Шокли, Нойса, Саа (ШНС) [2]. В ней представлена модель ВАХ, основанная на механизме рекомбинации носителей заряда (НЗ) в области пространственного заряда (ОПЗ) симметричного $p-n$ -перехода через равномерно распределённые уровни дефектов:

$$J_{\text{rec}} = q \frac{\sigma_t N_t W}{2} n_i V_T \exp\left(\frac{qU}{2kT}\right) = J_s \exp\left(\frac{qU}{2kT}\right), \quad (3)$$

где W – ширина ОПЗ, σ_t – сечение захвата рекомбинационных центров, V_T – тепловая скорость, N_t – концентрация рекомбинационных центров в ОПЗ, n_i – собственная концентрация НЗ, $J_s = q \frac{\sigma_t N_t W}{2} n_i V_T$ – ток насыщения; ФН в (3) принят равным 2.

Впоследствии Чу [3] развил эту модель для несимметричных $p-n$ -переходов, сохранив предположение о равномерном распределении концентрации дефектов в ОПЗ.

Экспериментально наблюдаемые ВАХ с ФН между 1 и 2 объясняют конкуренцией того или иного механизма рекомбинации [4], утверждая, что вследствие равенства полного прямого тока сумме диффузионного и рекомбинационного токов ФН может лежать в пределах от 1 до 2.

В 1994–1996 гг. были созданы первые СД с КЯ синего и зелёного света на основе гетероструктур $AlGaIn/InGaIn/GaN$ [5, 6], а также СД красного света на основе гетероструктур $AllnGaP$. С этого момента начались интенсивные исследования свойств этих СД [7–12]. Их электрофизические характеристики, в частности ВАХ, существенно отличаются от характеристик предыдущих СД. Так ФН СД с КЯ значительно меняется по всей области зависимости тока от напряжения [13, 14] и может принимать значения от 1,2 до 5 и больше. При относительно небольших плотностях тока (порядка 1 A/cm^2) у всех без исключения СД на основе GaN и $AllnGaP$ на ВАХ в полугогарифмических координатах наблюдается отклонение от экспоненциальной зависимости и стремление тока к насыщению. Для объяснения этих фактов предлагаются разные модели, в которых предполагаются высокое сопротивление контактов и конкуренция между разными механизмами рекомбинации. При этом не берётся во внимание образование заряда свободных НЗ в области контакта широкозонных полупроводников [15, с. 156].

Была разработана феноменологическая модель темпа рекомбинации *ABC*, основанная на моделях механизмов Шокли-Рида-Холла (ШРХ), излучательной и оже-рекомбинаций [16–19]. Модель *ABC* достаточно логично объясняет поведение квантовой эффективности СД с КЯ при изменении плотности прямого тока, но так и не использована для создания математической модели ВАХ. И по настоящее время исследователи продолжают использовать формулы (2) и (3) для описания ВАХ СД с КЯ, что некорректно, учитывая, что рекомбинация в слое ОПЗ СД с КЯ происходит в узких локальных областях – слоях КЯ шириной в несколько единиц нанометров. Этот факт учтён в работах [20, 21].

Большое внимание анализу токообразования в СД с КЯ уделено в работах [13, 22], основная направленность которых – объяснение падения эффективности при относительно невысоких плотностях тока, но выражений для описания ВАХ не получено.

Во всех работах по анализу экспериментальных ВАХ СД, как на основе гомопереходов, так и – гетеро-*p-n*-структур с КЯ, приводится формула, по которой ФН определяют дифференцированием логарифма плотности тока по напряжению:

$$n = \left[kT \left(\frac{d}{dU} \ln(J) \right) \right]^{-1}. \quad (4)$$

Очевидно, это некорректно, так как экспериментальные ВАХ представляют собой дискретную таблицу соответствия тока напряжению смещения, а не аналитическую функцию. Поэтому правильнее пользоваться для этого формулой

$$n = \left[kT \left(\frac{\Delta \ln(J)}{\Delta U} \right) \right]^{-1}, \quad (5)$$

в которой $\Delta \ln(J)$ – приращение логарифма плотности тока при приращении напряжения смещения на ΔU . Но ни в одной работе не давалось сведений о значениях этих приращений для ведения расчётов. (А от этого существенно зависит результат.)

В подавляющем большинстве экспериментальных материалов сам ФН и предэкспоненциальный множитель формулы ВАХ СД с КЯ заметно меняются при изменении напряжения смещения [14], а формулы (4) и (5) подразумевают их постоянство.

Учитывая сказанное, следует определиться, какой параметр рассчитывается по (5) для всего диапазона ВАХ: кратная kT обратная величина отношения приращения функции $\Delta \ln(J)$ к приращению аргумента ΔU или коэффициент, который характеризует несоответствие экспоненциального множителя $\exp[qU/(n^* \cdot kT)]$ идеальному виду $\exp[qU/(kT)]$? Очевидно – кратная kT обратная величина отношения $\Delta \ln(J)/\Delta U$. (Здесь n^* – коэффициент отклонения экспоненциального множителя от приведённого в [1]). В показатель экспоненты в (2) входит коэффициент

отклонения от идеальной модели ВАХ Шокли, основанной на распределении Больцмана. Вследствие этого далее в статье определяемый по (5) ФН будем обозначать как n , а коэффициент, входящий в показатель экспоненты, – n^* (эн со звёздочкой).

Проведённый обзор работ позволяет заключить, что в них: 1) при анализе экспериментальных данных по СД с КЯ используются математические модели ВАХ Шокли и ШНС, не учитывающие особенностей их технологической структуры; 2) не рассматриваются случаи неравномерного распределения рекомбинационных центров [23, 24], характерного для светодиодных структур. Эти выводы позволили сформулировать цель и задачи работы:

- цель – разработка математической модели ВАХ *p-n*-структур с КЯ с учётом их параметров и расположения в ОПЗ;

- задачи – экспериментально установить общие для всех видов *p-n*-светодиодных структур свойства ВАХ, обосновать необходимость разработки математической модели ВАХ *p-n*-структур с неоднородным распределением рекомбинационных центров в ОПЗ, установить зависимость коэффициента n^* и ФН n от технологических параметров *p-n*-структуры¹.

В качестве исходных положений было принято, что *p-n*-структуры исследованных СД равномерно легированы со стороны как *p*-, так и *n*-областей, имеют обеднённый слой с резкими границами, в обеднённой области для свободных НЗ справедливо распределение Больцмана, уровни рекомбинационных центров расположены вблизи середины запрещённой зоны, а сечения захвата электронов и дырок одинаковые.

Методики и результаты эксперимента

Экспериментально были получены ВАХ СД на основе *p-n*-структур *AlGaIn/InGaIn/GaN* с КЯ синего и зелёного света фирмы *Cree*, СД фирмы *Lumileds* синего, зелёного и красного (на основе *AllnGaP*) света, а также СД белого света производства КНР (обозначены в экспериментальных результатах, ниже, как А1, А3, СС, и СW). Каждая партия содержала не менее 10 СД и выбиралась из одной технологической группы. На приведённых рисунках (рис. 1–3) экспериментальные результаты представлены не для всех исследованных СД из-за большого объёма информации, но основные закономерности для них соответствуют приведённым в работе.

Использованные в экспериментах СД обладали достаточно протяжёнными экспоненциальными участками ВАХ в диапазоне плотности тока 10^{-4} – 10^2 А/см². При этом исследованию разнообразных характеристик этих СД, включая ВАХ, посвящены, например, работы [25, 26]. Измерения при больших плотностях тока не проводились, так как при них велика вероятность проявления токов утечки, которые вносили бы фоновое дополнение к классическому генерационно-рекомбинационному механизму прямого тока исследуемых СД.

ВАХ СД (рис. 1) измерялись с помощью компьютеризированной установки со стабилизированным напряжением

¹ В задачи работы не входило установление взаимосвязи ФН n с токами утечки по поверхности или через внутренние шунты диодных структур, учёт последовательного омического сопротивления квазинейтральных областей и контактов и рассмотрение режима высокого уровня инжекции; в работе рассматривался только режим прямого смещения, основной для СД.

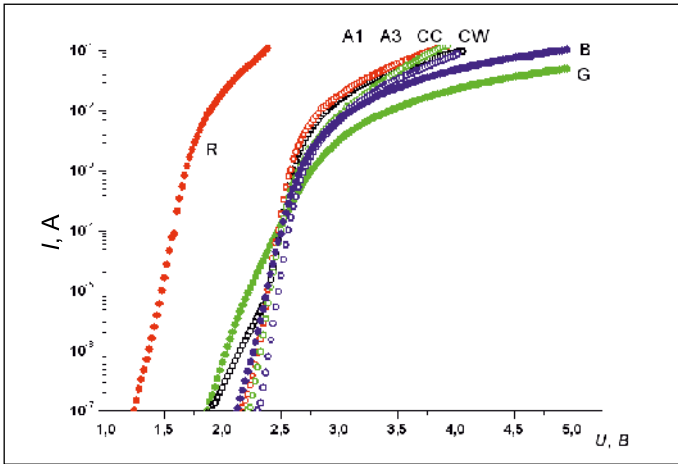


Рис. 1. ВАХ светодиодов красного, на основе $AlInGaP$, (R), зелёного (G) и синего (B) света фирмы Lumileds, а также – белого света, со структурой кристаллов $AlGaIn/InGaIn/GaN$ (A1, A3, CC, CW) производства KHP

ем смещения. Прямой ток менялся в диапазоне 10^{-7} – 10^{-1} А (плотность тока 10^{-4} – 10^2 А/см²). Шаг по напряжению равнялся $(20 \pm 0,01)$ мВ. При таких плотностях прямого тока режим высокого уровня инжекции не создаётся и наблюдается достаточно протяжённый экспоненциальный участок.

Кроме того, с целью выявления связи между видом ВАХ и особенностями легирования p – n -перехода у некоторых типов СД измерялись профили распределения примеси (рис. 2) с применением метода и установки, описанных в [27]. Отсчёт распределения примеси ведётся от металлургической границы в относительно слабо легированной области.

Все измерения проводились при комнатной температуре (23–25) °С. В расчётах и моделировании тепловой потенциал kT принимался равным 0,0259 эВ.

Обработка экспериментальных данных и моделирование ВАХ велись с использованием программ «MathCad-14» и «Origin-8».

Из рис. 2 видно, что характер распределения примеси в слабо легированной области p – n -структур весьма разнообразен, в то время как формы ВАХ однотипных СД почти не различаются. В полулогарифмических координатах выделяются протяжённые почти линейные участки на 2–4 порядка изменения тока с последующим значительным отклонением от экспоненциальности при плотностях тока выше 1–2 А/см². Для расчёта n использовалась формула (5).

Увеличение ФН приведённых ВАХ при токах, больших соответствующих экспоненциальному участку, обусловлено разными причинами, например, рассмотренными в [28], а также особыми явлениями, например образованием внутри ОПЗ p – n -перехода ускоряющего электрического поля, но в данной статье подобные эффекты рассматриваться не будут. Измерения показали, что экспоненциальные участки разных ВАХ обладают существенным разбросом ФН n и тока насыщения даже в одной группе СД.

Результаты

Энергетическую модель несимметричной, например, p – n^+ -структуры (сильно легирована n -область) можно представить в виде потенциального барьера бесконечной про-

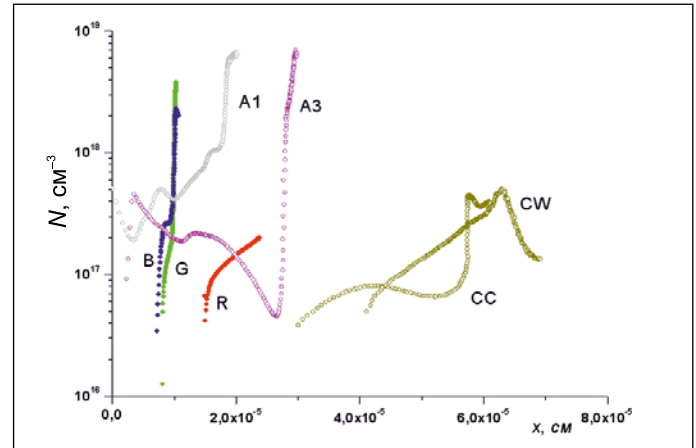


Рис. 2. Профили распределения концентрации примеси в слабо легированной области светодиодных структур с КЯ красного, на основе $AlInGaP$, (R), зелёного (G) и синего (B) света фирмы Lumileds, а также – белого света, со структурой кристаллов $AlGaIn/InGaIn/GaN$ (A1, A3, CC, CW) производства KHP

тяжённости высотой φ_k . Потенциал фронта, образующий ОПЗ p – n^+ -перехода в слабо легированном p -слое, растёт по некоторому закону. На этот барьер из квазинейтральной n^+ -области движется поток электронов широкого диапазона энергий с тепловой скоростью V_T . Электроны с энергией выше $(\varphi_k - qU)$ преодолевают ОПЗ и переходят в смежную квазинейтральную область p -типа. В ней они создают диффузионный ток неосновных НЗ, плотность которого при $qU > 3kT$ выражается как

$$J_{\text{dif}} = q \frac{L_n}{\tau_n} N_d \exp\left(-\frac{\varphi_k - qU}{kT}\right). \quad (6)$$

Разделив и умножив правую часть на V_T и обозначив $\frac{L_n}{\tau_n V_T}$ как r_d , запишем выражение для прямого тока при диффузионном механизме в виде

$$J_{\text{dif}} = qr_d V_T N_d \exp\left(-\frac{\varphi_k - qU}{kT}\right) = qr_d V_T N_d \exp\left(-\frac{\varphi_k}{kT}\right) \exp\left(\frac{qU}{kT}\right) = J_0 \exp\left(\frac{qU}{kT}\right). \quad (7)$$

Это идеальный вид ВАХ по Шокли, при котором $n = n^* = 1$ во всём диапазоне напряжений (токов). Множитель J_0 при идеальной ВАХ не зависит от напряжения смещения, и поэтому $n = n^*$.

Физический смысл коэффициента r_d – отношение скорости диффузионного потока НЗ на уровне $(\varphi_k - qU)$ к тепловой скорости; $J_0 = qr_d V_T N_d \exp\left(-\frac{\varphi_k}{kT}\right)$ – плотность тока

насыщения. НЗ с энергией ниже $(\varphi_k - qU)$, достигнув фронта барьера, будут рекомбинировать по модели ШНС через локальные рекомбинационные центры с дырками, проникшими в ОПЗ из p -области. Полный ток будет равен сумме диффузионного и рекомбинационного токов.

Теория ШНС применима и к p – n -структурам с КЯ, если КЯ представить в виде плоскостей рекомбинации. Такая идея высказана в [20, 21].

В настоящей работе предлагается принять, что расположенная в любом месте ОПЗ тонкая КЯ служит единичным

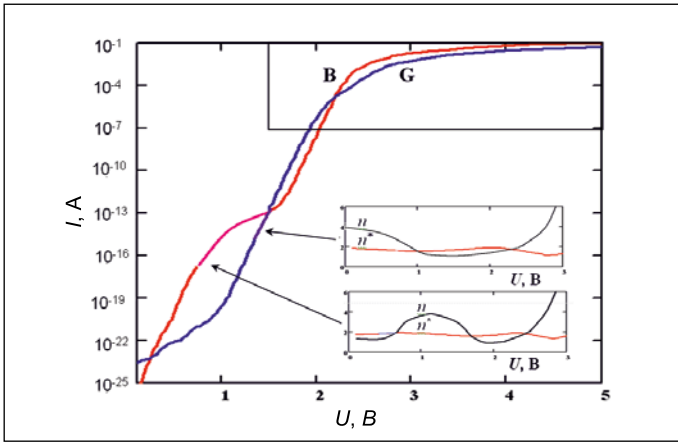


Рис. 3. Модельные ВАХ светодиодов синего (B) и зелёного (G) света на основе гетероструктур $AlGaIn/InGaNGaN$ с пятью КЯ. Контурами выделены области ВАХ, соответствующие экспериментальным ВАХ по рис. 1, а на вставках изображены соответствующие зависимости ФН n и коэффициента n^* от напряжения смещения

центром рекомбинации с сечением захвата σ . Положения КЯ в ОПЗ и распределение рекомбинационных центров точечных дефектов в барьерах могут быть описаны некоторой функцией $N(x)$:

$$N(x) = N_i(x) + \sum_i \frac{1}{H} \begin{cases} 0 \mapsto x < a_i \\ a_i \geq x \geq (a_i + H), \\ 0 \mapsto x > (a_i + H) \end{cases} \quad (8)$$

где $N_i(x)$ – распределение концентрации точечных дефектов, i – номер КЯ, H – ширина КЯ, a – расположение левого края КЯ относительно металлургической границы p - n -структуры.

Используя идеи модели ШНС, плотность тока можно выразить формулами

$$J_{\text{rec}} = q\sigma N_{\text{tmd}}(U)W(U)V_T N_d F(U), \quad (9)$$

где $N_{\text{tmd}}(U)$ – средняя по ОПЗ концентрация рекомбинационных центров точечных дефектов и КЯ, зависящая от напряжения смещения вследствие изменения ширины ОПЗ и числа находящихся в ней КЯ и точечных дефектов;

$$N_{\text{tmd}}(U) = \frac{1}{W(U)} \int_{x_n}^{x_p} [N(x)] dx; \quad f(x, U) = \frac{N(x)}{N_{\text{tmd}}(U)};$$

$$x_n = -\frac{W(U) \cdot N_a}{N_d + N_a}, \quad x_p = \frac{W(U) \cdot N_d}{N_d + N_a},$$

$$F(U) = \int_{-x_n}^{x_p} \frac{1}{W(U)} \cdot \frac{f(x, U) \cdot \exp\left(-\frac{\varphi_k}{kT}\right) \left(\exp\left(\frac{qU}{kT}\right) - 1\right)}{b \cdot \exp\left(-\frac{(\varphi_k - qU)}{W(U) \cdot kT}(x - x_n)\right) + \exp\left[-\frac{(\varphi_k - qU) - \frac{(\varphi_k - qU)(x - x_n)}{W(U)}}{kT}\right] + g} dx =$$

$$= \exp\left(\frac{-\varphi_k}{n^* \cdot kT}\right) \cdot \exp\left[\frac{qU}{n^* \cdot kT} - 1\right], \quad (10)$$

$$W(U) = \sqrt{\frac{2\epsilon\epsilon_0(N_a + N_d) \cdot \left(\frac{\varphi_k}{q} - U\right)}{qN_a N_d}} \quad (\text{для равномерного}$$

распределения примеси), N_a и N_d – концентрации акцепторных и донорных примесей, $b = N_d/N_a$, $g = 2n_i/N_a$.

С использованием коэффициента $r_r(U) = \sigma N_{\text{tmd}}(U) \cdot W(U)$ формула (9) преобразуется к виду

$$J_{\text{rec}} = q r_r(U) V_T N_d \exp\left(-\frac{\varphi_k}{n^*(U) \cdot kT}\right) \times$$

$$\times \left(\exp\left(\frac{qU}{n^*(U) \cdot kT}\right) - 1\right) = J_s(U) \left[\exp\left(\frac{qU}{n^*(U) \cdot kT}\right) - 1\right]. \quad (11)$$

В формуле (10) принято допущение, что фронт потенциального барьера растёт линейно, и поэтому в ней он обозначен как $\varphi(x) = \frac{(\varphi_k - qU)}{W(U)}(x_n - x)$;

$$J_s(U) = q r_r(U) V_T N_d \exp\left(-\frac{\varphi_k}{n^*(U) kT}\right).$$

Физический смысл коэффициента $r_r(U)$ – отношение скорости рекомбинационного потока НЗ на уровне $(\varphi_k - qU)/n^*$ к тепловой скорости.

Коэффициент n^* определяется по формуле

$$n^*(U) = -\frac{(\varphi_k - qU)}{kT} [\ln(F(U))]^{-1}.$$

Очевидно, дифференцирование (11) даст значения ФН n , большие значений n^* . Экспериментально определять n^* довольно сложно.

Функция $f(x, U)$ в формуле (10) приводит к вариациям n^* в пределах от 1 до 2, а зависимость предэкспоненциального множителя от напряжения – к большим значениям ФН n .

Большие значения ФН, от 3,3 до 5, характерны для p - i - n -структур и при зависимости концентраций примесей на краях ОПЗ от изменения напряжения смещения, т.е. когда в предэкспоненциальном множителе N_a и N_d являются функцией напряжения смещения $N_a(U)$ и $N_d(U)$. Эта ситуация реальна, так как концентрация примеси со стороны как n^+ - так и p -слоёв спадает к металлургической гра-

нице практически экспоненциально, создавая вблизи неё компенсированную область (рис. 2).

В отличие от случаев с гомо- p - n -структурами и равномерного распределения рекомбинационных центров, в которых темп рекомбинации сохраняет своё значение при изменении ширины ОПЗ, в структурах с КЯ ситуация сложнее. КЯ сохраняют своё положение, а край ОПЗ при повышении напряжения смещается в сторону металлургической границы. Положение максимума темпа рекомбинации меняется относительно КЯ. Это – причина вариации темпа роста прямого тока при изменении напряжения, т.е. вариаций ФН n и коэффициента n^* , как это видно из рисунков в работах [13, 14].

В структурах с множественными КЯ при $U = 0$ все КЯ находятся в ОПЗ. По мере повышения прямого напряжения часть КЯ, расположенных ближе к краю ОПЗ слабо легированного слоя, выходит из ОПЗ и в них возникает межзонная рекомбинация, обусловленная протеканием диффузионного тока в квазинейтральной области – области расположения КЯ. Поэтому полный ток будет равен сумме этих токов.

Заключение

По полученным математическим моделям (9) и (10) с использованием пакета «MathCad 14» были синтезированы графики ВАХ разных СД. Модельные ВАХ СД синего (B) и зелёного (G) света, а также зависимости ФН n и коэффициентов n^* от напряжения U для них приведены на рис. 3. Ширина КЯ – 4 нм, а период их следования для СД синего и зелёного света – 15 и 16 нм соответственно. Степень легирования относительно слабо легированной области принята равной $7 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$, а сильно легированной (инжектора) – $2 \cdot 10^{19} \text{ см}^{-3}$. Параметры полупроводников взяты из [29]. Для моделирования ВАХ в области ограничения тока в диапазоне свыше $1 \cdot 10^{-4} \text{ А}$ принято последовательное сопротивление $R = 10 \text{ Ом}$.

Выводы

1. Разработана физико-математическая модель ВАХ светодиодных p - n -структур с КЯ, отличающаяся от модели ШНС тем, что в неё введена функция неоднородного распределения КЯ и точечных дефектов в ОПЗ p - n -структуры $f(x, U)$.

2. КЯ в светодиодных структурах можно представлять как единичные рекомбинационные центры, распределённые по ОПЗ, с сечением захвата σ . Темп рекомбинации в КЯ определяется положением максимума распределения темпа рекомбинации по ШНС относительно КЯ, а квантовая эффективность – соотношением темпов излучательной и безызлучательной компонент по модели ABC.

3. Коэффициент n^* в показателе экспоненты ВАХ и производная логарифма плотности тока по напряжению n (ФН) – разные понятия. Первый параметр отражает отличие экспоненциального множителя от модели Шокли, а второй характеризует поведение функциональной зависимости прямого тока от напряжения.

4. Физический смысл коэффициента n^* – отношение значения контактного потенциала φ_k к эффективному уровню энергии протекания носителей заряда к области рекомбинации в ОПЗ.

5. Значения ФН свыше 2 объясняются зависимостью от напряжения смещения как показателя экспоненты, так и предэкспоненциального множителя.

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. Shockley W. The Theory of p - n Junctions in Semiconductors and p - n Junction Transistors // *Belt Syst. Tec. J.* – 1949. – Vol. 28 – P. 435–489.
2. 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.
3. Choo, S.C. Carrier generation-recombination in the space-charge region of an asymmetrical p-n junction // *Solid State Electron.* – 1968. – Vol. 11. – P. 1069–1077.
4. Зу С.М. Физика полупроводниковых приборов. Пер. с англ. под ред. Р.А. Сурица. В 2-х книгах. Кн. 1-я. 2-е перераб. и доп. изд. – М.: Мир, 1984. – 456 с.
5. Nakamura S., Iwasa M.S. Method of manufacturing p-type compound semiconductors / Patent N5,306,662. Apr.1994. Japan.
6. Amano H., Akasaki I. et.al. Method for producing a luminous element of III-group nitride / Patent N5,496,766. Mar. 1996. Japan.
7. Kong H-S., Leonard M., Bulman G., Negley G., Edmond J. AlGaIn/GaN/AlGaIn double-heterojunction blue LEDs on 6H-SiC substrates// *Mat. Res. Soc. Proc.* – 1996. – Vol. 395. – P. 903–907
8. Nakamura, S. InGaIn light-emitting diodes with quantum-well structures // *Mat. Res. Soc. Pros.* – 1996. – Vol. 395. – P. 979–887.
9. Кудряшов В.Е., Туркин А.Н., Юнович А.Э., Ковалёв А.Н., Маняхин Ф.И. Люминесцентные и электрические свойства светодиодов InGaIn/AlGaIn/GaN с множественными квантовыми ямами // *ФТП.* – 1999. – Т. 33, № 4. – С. 445–450.
10. Yunovich A.E., Kudryashov V.E., Turkin A.N., Kovalev A.N., Manyakhin F.I. Electroluminescence Properties of InGaIn/AlGaIn/GaN Light Emitting Diodes With Multiple Quantum Wells // *MRS Intern. J. Nitride Semicond. Res.* – 1999. – 4S1, G6. – S. 29.
11. Yunovich, A.E., Kudryashov, V.E., Mamakin, S.S., Turkin, A.N., Kovalev, A.N., Manyakhin, F.I. Spectra and quantum efficiency of light emitting diodes based on GaN-heterostructures with quantum wells // *Physica Status Solidi (A).* –1999. – Vol. 176, No. 1. – P. 125–130.
12. Manyakhin, F.I. Kovalev, A.N., Kudryashov, V.E., Mamakin, S.S., Yunovich, A.E. Change of charge centers distribution in AlGaIn/InGaIn/GaN heterostructures with multiple quantum wells during LED's aging at high currents // *The Fourth European GaN Workshop. Nottingham, abstract.* – 2000. – 2D.
13. Бочкарёва Н.И., Ребане Ю.Т., Шретер Ю.Г. Рост скорости рекомбинации Шокли-Рида-Холла в квантовых ямах InGaIn/GaN как основной механизм падения эффективности светодиодов при высоких уровнях инжекции // *ФТП.* – 2015. – Т. 49, № 12. – С. 1714–1719.
14. Рисованный В.Д., Светухин В.В., Вострецов Д.Я., Вострецова Л.Н., Амброзевич А.С., Ермаков М.С. Влияние длительного протекания прямого тока на электрические характеристики светодиодов на основе InGaIn // *Успехи прикладной физики.* – 2013. – Т. 1, № 1. – С. 92–96.
15. Плукс Г.Е. Основы теории полупроводниковых приборов. – М.: Наука, ГРФМЛ, 1965. – 448 с.
16. Zang M., Bhattacharya P., Singh J., Hinckley J. Direct measurement of auger recombination in $\text{In}_{0,1}\text{Ga}_{0,9}\text{N}/\text{GaN}$ quantum well and its impact on the efficiency in $\text{In}_{0,1}\text{Ga}_{0,9}\text{N}/\text{GaN}$ multiply quantum well light emitting diodes // *Applied Physics Letters.* – 2009. – Vol. 95, No. 20. – P. 1108.
17. 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 InGaIn/GaN light emitting diodes // *J. Appl. Phys.* – 2017. – Vol. 122, No. 23. – P. 4505.
18. 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.

19. Dai Q., Shan Q., Wang J., Chhajed S., Cho J.M., Shubert E.F., Crawford 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.

20. Masui H., Nakamura S., DenBaars S.P. Technique to evaluate the diode ideality factor of light-emitting diodes // Appl. Phys. Lett. – 2010. – Vol. 96, No. 7. – P. 3509.

21. Masui H. Diode ideality factor in modern light-emitting diodes // Semicond. Sci. Technol. – 2011. – Vol. 26, No. 7. – P. 5011–5016.

22. Прудаев 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 $(Al_xGa_{1-x})_{0.5}In_{0.5}P/(Al_yGa_{1-y})_{0.5}In_{0.5}P$ // Известия вузов. Физика. – 2013. – Т. 56, № 8. – С. 44–47.

23. Торчинская Т.В., Карабаев А.Г., Шейнкман М.К. Инжекционно-стимулированная трансформация спектров люминесценции зелёных GaP: N светодиодов // ФТП. – 1990. – Т. 24, № 8. – С. 1337–1348.

24. Абдуллаев Ж.С., Гусев М.Ю., Зюганов А.Н., Торчинская Т.В. Параметры глубоких центров в светодиодах AlGaAs, оценённые методами ёмкостной и инжекционной спектроскопии // Укр. физ. Журнал. – 1989. – Т. 34, № 8. – С.1220–1224.

25. Маняхин Ф.И. Механизм и закономерность снижения светового потока светодиодов на основе структур AlGaIn/GaN/GaP с квантовыми ямами при длительном протекании прямого тока различной плотности // ФТП. – 2018. – Т. 52, № 3. – С. 378–384.

26. Маняхин Ф.И. Роль компенсированного слоя в формировании вольт-амперной характеристики светодиодов на основе широкозонных полупроводников // Известия вузов. Материалы электронной техники. – 2009. – № 3. – С. 51–56.

27. 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.

28. Маняхин Ф.И. Природа сопротивления компенсированного слоя и механизмы рекомбинации в светодиодных структурах // Известия вузов. Материалы электронной техники. – 2006. – № 4. – С. 20–25.

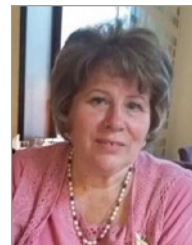
29. NSM Archive. Physical Properties of Semiconductors. URL: <http://www.ioffe.rssi.ru/SVA/NSM/Semicond/> (дата обращения: 28.02.2020).



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



Ватмана Артур Бунтавович, инженер. Окончил в 1999 г. кафедру «Микроэлектроника и полупроводниковые приборы» МИСиС. Старший преподаватель кафедры «Электротехника и информационно-измерительные системы» НИТУ «МИСиС». Область научных интересов: физика светодиодов, экспериментальные исследования характеристик светодиодов



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

МЕЖДУНАРОДНЫЕ КОНФЕРЕНЦИИ И ВЫСТАВКИ В 2020 ГОДУ (IV квартал)

Дата	Название мероприятия	Место проведения
06–09.10	Энергосбережение и энергоэффективность. Инновационные технологии и оборудование – 2020 12-я Международная специализированная выставка	Санкт-Петербург, РФ exponet.ru
	Агросалон – 2020 Международная специализированная выставка сельскохозяйственной техники	Москва, РФ exponet.ru
14–16.10	Taiwan Int'l Lighting Show Международная светотехническая торгово-промышленная выставка и конференция	Тайбей, Тайвань lightsearch.com
19–22.10	Технофорум - 2020 Международная выставка оборудования и технологий обработки конструкционных материалов	
	ExpoCoating Moscow - 2020 18-я Международная выставка материалов и оборудования для обработки поверхности, нанесения покрытий и гальванических производств	Москва, РФ exponet.ru
27–29.10	Hi-Tech Building - 2020 19-я Международная выставка «Автоматизация зданий и электротехнические системы» с конференцией «Интеллектуальное здание»	
	Testing & Control - 2020 17-я Международная выставка испытательного и контрольно-измерительного оборудования	
11–13.11	Российский промышленник - 2020 Международный промышленный форум	Санкт-Петербург, РФ exponet.ru

Современная система прямого оптического широкополосного контроля толщины напыляемых оптических покрытий

*О.Ф. ПРОСОВСКИЙ¹, А.Ю. БУДНЕВ¹, **Д.Г. ДЕНИСОВ²,
Н.В. БАРЫШНИКОВ², Ю.О. ПРОСОВСКИЙ²

¹ АО «ОНПП «Технология» им. А.Г. Ромашина», Обнинск, Калужская обл.

² ФГБОУ ВО «МГТУ им. Н.Э. Баумана (НИУ)», Москва

E-mail: *pof@mail.ru, **denisov_dg@mail.ru

Аннотация

Проанализированы схемотехнические решения построения систем прямого и косвенного контроля создаваемых светофильтров и предложено принципиально новое решение системы контроля, обеспечивающее высокие эксплуатационные характеристики этих изделий. Предложен оригинальный подход к созданию и реализации современной широкополосной системы по методу прямого оптического контроля толщины наносимых оптических покрытий. Проведена апробация разработанной системы контроля, результатами которой (выходными характеристиками) являются спектральные зависимости коэффициента пропускания. Проведён анализ таких зависимостей для интерференционных светофильтров, полученных с использованием разных систем оптического контроля. Сделаны прогнозы по дальнейшей модернизации системы прямого широкополосного оптического контроля толщины напыляемых покрытий.

Ключевые слова: интерференционные светофильтры, оптический прямой широкополосный контроль, толщина покрытий, вакуумная установка, спектр, спектральная зависимость коэффициента пропускания (отражения).

Предисловие

Сегодня трудно найти изделия конструкционной и приборной оптики, изготавливаемые без тех или иных покрытий на их поверхности. Так, например, прочно вошли в жизнь покрытия, модифицирующие поверхность изделий для их большей устойчивости к влиянию внешних факторов (стиранию, воздействию агрессивных веществ), улучшения оптических

свойств (просветление) и придания принципиально новых оптических свойств (поляризация и фильтрация излучения и др.).

При этом один из самых ответственных элементов напылительного оборудования – система контроля толщины наносимых плёнок, определяющая (в основном) технологические возможности напылительного оборудования при нанесении многослойных интерференционных структур. Кроме того, напрямую с качеством и воспроизводимостью процесса формирования многослойных оптических покрытий связан контроль оптических констант [1].

Современные методы контроля толщины оптических покрытий

Современное напылительное оборудование базируется на методах прямого и косвенного контроля, вследствие чего точность измерения толщины плёнок наносимых оптических покрытий не всегда удовлетворяет требованиям заказчика. В настоящее время оптические системы контроля можно разделить на 2 основных типа [2]:

1. Системы косвенного оптического контроля, использующие образцы-спутники (свидетели) для измерения спектрального коэффициента пропускания (отражения) наносимого по-

крытия (обычно располагаемые в центре подложкодержателя).

2. Системы прямого оптического контроля, в которых измерение спектрального коэффициента пропускания (отражения) производится непосредственно на изделии, закреплённом на вращающемся подложкодержателе.

Наиболее полную информацию о конструкции наносимой плёнки может обеспечивать только система прямого широкополосного оптического контроля [3]. Она анализирует информацию о спектральной зависимости коэффициента пропускания (СЗКП) покрытия в заданном диапазоне длин волн, позволяет определять дисперсию оптических констант (показателей преломления и поглощения) и толщину напыляемых плёнок непосредственно во время формирования покрытия на изделии в вакууме. Как правило, современное оборудование комплектуется ионными источниками ассистирования процесса напыления, что, в свою очередь, обеспечивает неизменность оптических констант при извлечении изделия с покрытием на воздух из вакуумной камеры. Данный факт показывает неоспоримое преимущество современного напылительного оборудования.

Функционирование рассматриваемой современной широкополосной системы прямого оптического контроля подразумевает проведение трёх циклов измерения на каждом обороте подложкодержателя, что обусловлено необходимостью получения высокоточных измерений [4]. На рис. 1 показан подложкодержатель, на котором выделено 3 области, имеющие отношения к системе прямого оптического контроля:

– Область 1 – изделие, по которому производится измерение СЗКП напыляемого покрытия.

– Область 2 – участок подложкодержателя, не пропускающий излуче-

Рис. 1. Пример действующей широкополосной системы оптического контроля



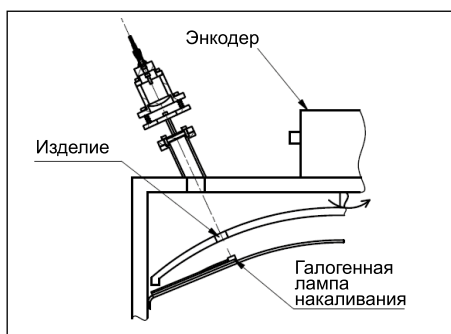


Рис. 2. Структурная схема предлагаемой системы прямого широкополосного оптического контроля толщины напыляемых покрытий

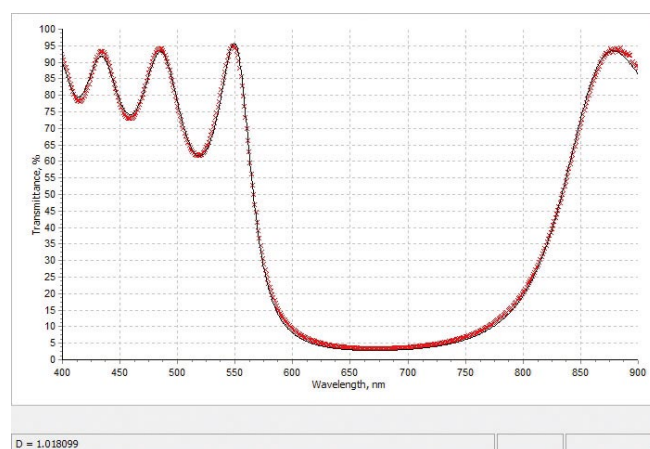


Рис. 3. Пример расчётной и экспериментальной СЗКП многослойного оптического покрытия

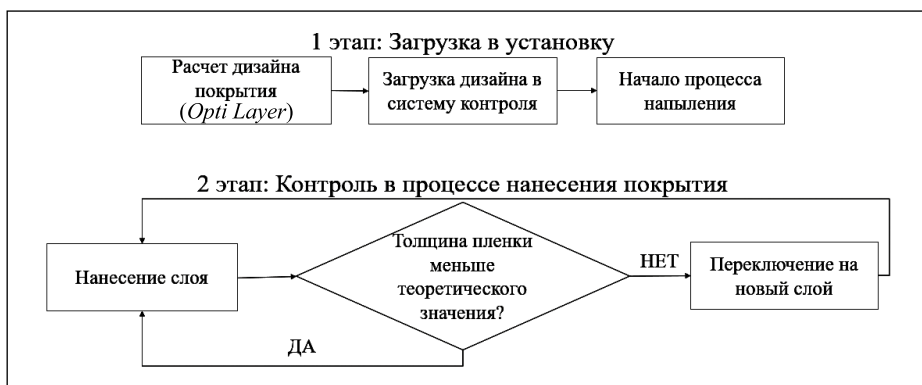


Рис. 4. Процесс контроля толщины напыляемого покрытия

– Широкий спектральный диапазон измерений: 400–1100 нм.

– Применение математического аппарата для обработки информации о СЗКП наносимых покрытий в широком спектральном диапазоне, который позволяет проводить реанализ конструкции напыляемого покрытия и в ходе технологического процесса нанесения оставшимися ненапыленными слоями покрытия нивелировать ошибки, возникшие при напылении предыдущих слоёв.

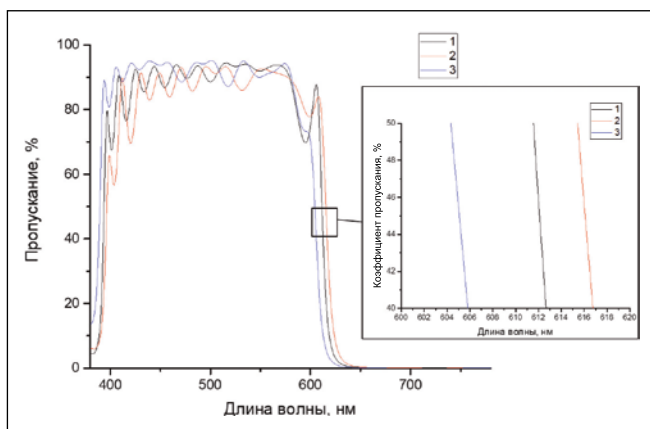
– Обеспечение практически полного совпадения получаемых расчётных и экспериментальных СЗКП.

На основе предложенного метода, авторами проведена апробация разработанной ими системы контроля, результатом которой явились её выходные характеристики – СЗКП. На рис. 3 приведены графики СЗКП, характеризующие точность системы контроля, посредством которой производилось измерение толщины напыляемых плёнок при изготовлении 9-слойного интерференционного покрытия. Как видно из рисунка, СЗКП изготовленного светофильтра (красная кривая) практически полностью совпадает с СЗКП, рассчитанной с помощью программы «OptiLayer»¹ (чёрная кривая).

В ходе производства контроль толщины оптического покрытия выполняется оператором на основе анализа расчётной СЗКП, вычисляемой посредством указанной программы для каждого слоя покрытия.

В процессе напыления СЗКП, которая измеряется на изделии долж-

Рис. 5. СЗКП отрезающего светофильтра, полученного в ходе трёх технологических процессов с использованием системы контроля с оптическим свидетелем в центре камеры



ные (0 %-ное пропускание), для измерения темнового тока.

– Область 3 – отверстие (100 %-ное пропускание), в котором производится измерение коэффициента пропускания.

Особенности предлагаемого современного метода системы прямого широкополосного оптического контроля толщин слоёв следующие.

– Измерение коэффициента пропускания выполняется прямо на изделии, закреплённом на вращающемся подложкодержателе.

– Для обеспечения высокой точности измерения применяется цифровой

энкодер (рис. 2), что позволяет производить измерения практически в одной и той же физической точке изделия.

– Измерение на каждом обороте подложкодержателя выполняется в 2 основных этапа: калибровка и измерение. Калибровка состоит в измерении пропускания в 0 и 100 % (области 2 и 3 на рис. 1), после чего производится измерение на самом изделии (область 1 на рис. 1).

¹ «OptiLayer» – программный продукт, предназначенный для моделирования, оптимизации и расчёта оптических покрытий и их характеристик. Область применения – тонкоплёночные покрытия. Он позволяет пересчёт параметров слоёв покрытия для нивелирования ошибок уже нанесённых слоёв [5].

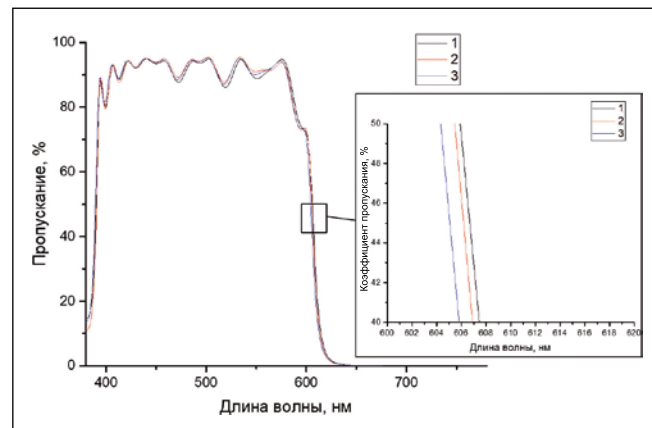
на совпасть с расчётной (теоретической) СЗКП, которая задана у оператора. В случае наложения двух графиков СЗКП, оператор останавливает напыление текущего слоя и запускает напыление следующего. На рис. 4 приведён комплексный алгоритм действия разрабатываемой системы контроля толщины наносимых покрытий и системы автоматизированного проектирования «*OptiLayer*» в виде блок-диаграммы.

Сравнение точностных характеристик разработанной системы прямого контроля и системы косвенного контроля толщины оптических покрытий

На рис. 5 приведены спектральные характеристики светофильтров, полученных в 3-х разных процессах при использовании системы косвенного контроля с оптическим свидетелем в центре. На вставке на этом рисунке более детально показан разброс параметров $\lambda_{0,5}$ в спектральном диапазоне 605–620 нм, равный 14 нм. Такой разброс на практике приводит к тому, что часть изготовленных деталей оказывается бракованной. Более детальный анализ хода кривых на вставке с помощью программы «*OptiRe*»² показывает значения случайных отклонений толщин слоёв при воспроизводстве оптической конструкции в 3–5 %. Разный ход кривых в каждом из процессов свидетельствует о присутствии несистематической погрешности, что существенно осложняет автоматизацию процесса нанесения и контроля покрытия технологом.

Причиной возникновения столь больших ошибок воспроизводства толщин слоёв, скорее всего, является изменение телесного угла потока паров испаряемого вещества из тигля, ввиду изменения формы кратера вещества в тигле в ходе длительного технологического процесса, который занимает 4–5 ч. В результате этого на свидетеля и изделие наносятся плёнки, отличающиеся друг от друга по толщине. Данные погрешности носят несистематический характер, зависят от многих факторов и в боль-

Рис. 6. СЗКП отрезающего светофильтра, полученного в ходе трёх технологических процессов с использованием прямого оптического контроля



шинстве случаев крайне сложно прогнозируемы.

С целью минимизации погрешностей системы косвенного контроля была разработана и экспериментально исследована система прямого широкополосного оптического контроля, конструктивные элементы которой схематично показаны на рис. 2, а результаты экспериментальных исследований – на рис. 6, где показаны графики СЗКП светофильтров, полученных в ходе трёх разных технологических процессов с использованием прямого оптического контроля толщины наносимых покрытий.

Вставка на рис. 6 более детально показывает разброс параметра $\lambda_{0,5}$ – он составляет всего лишь 3 нм. При этом анализ хода кривых на этой вставке позволяет утверждать, что в ходе нанесения слоёв оптической конструкции благодаря использованию прямого оптического контроля в серии из трёх процессов соблюдается высокая точность воспроизводства отдельных слоёв от процесса к процессу. Анализ полученных результатов с помощью программно-вычислительного модуля «*OptiRe*» показывает наличие отклонений реально нанесённых слоёв от расчётных менее 0,5 %.

Обсуждение полученных результатов

На сегодня рассмотренная выше система прямого широкополосного оптического контроля находится в состоянии тестирования в АО «ОНПП «Технология» им. А.Г. Ромашина».

Планируется внедрение в неё программного модуля «*OptiReopt*» (входит в программный продукт «*OptiLayer*»), служащего библиотекой для поддержки контроля напыления оптических покрытий.

Так как в процессе напыления всё равно накапливаются погрешности (определяемые временем закрытия заслонки, неидеальностью условий работы и т.д.), то при нанесении большого (≥ 30) числа слоёв эти погрешности оказываются существенными, что может приводить к неудовлетворительности качества изделия. При этом планируется реализовать полностью автоматический процесс напыления, исключая человеческий фактор.

Итак, в результате проведённых исследований:

- разработана перспективная система оптического контроля – система прямого широкополосного оптического контроля. Она продемонстрировала в производственных условиях высокую воспроизводимость толщин слоёв интерференционных покрытий;
- осуществлена практическая реализация системы широкополосного прямого оптического контроля на установке электронно-лучевого испарения;
- произведено внедрение системы прямого широкополосного оптического контроля в технологический процесс производства интерференционных светофильтров для нужд приборной оптики (отрезающие, узкополосные и др. виды светофильтров).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Lequime M., Nadj S., Stojcevski D., Koc C., Grèzes-Besset C., Lumeau J. Determination of the optical constants of a dielectric layer by processing in situ spectral transmittance measurements along the time dimension // Appl. Opt. – 2017. – Vol. 56. – P. C181–C187.

² Программно-вычислительный модуль «*OptiRe*» направлен на определение параметров слоёв напылённых оптических покрытий на основе данных спектральной фотометрии и (или) эллипсометрии. Результаты, получаемые с помощью «*OptiRe*», обеспечивают обратную связь с процессом напыления. С помощью этих результатов можно вносить коррективы в параметры процесса напыления или в процесс контроля слоёв и повышать тем самым качество напыляемых покрытий. Входит в программный продукт «*OptiLayer*».

2. Окатов М.А., Антонов Э.А., Байгожин А. Справочник технолога-оптика. – СПб.: Политехника, 2004. – 679 с.

3. Nadjji S.L., Lequime M., Begou T., Koc C., Grézes-Besset C., Lumeau J. Use of a broadband monitoring system for the determination of the optical constants of a dielectric bilayer // Appl. Opt. – 2018. – Vol. 57. – P. 877–883.

4. Zhupanov V.G., Kozlov I.V., Fedoseev V.N., Kononov P., Trubetskov M.K., Tikhonravov A.V. Production of Brewster angle thin film polarizers using a ZrO₂/SiO₂ pair of materials // Appl. Opt. – 2017. – Vol. 56. – P. C30–C34.

5. URL: <https://www.optilayer.com/> (дата обращения: 20.01.2020).



Просовский Олег Фёдорович, инженер. Начальник лаборатории оптических покрытий АО «ОНПП «Технология» им. А.Г. Ромашина»



Буднев Александр Юрьевич, инженер. Инженер-технолог 3-й категории лаборатории оптических покрытий АО «ОНПП «Технология» им. А.Г. Ромашина»



Денисов Дмитрий Геннадьевич, инженер. Доцент кафедры РЛ-2 ФГБОУ ВО «МГТУ им. Н.Э. Баумана (НИУ)»



Барышников Николай Васильевич, инженер. Доцент кафедры РЛ-2 ФГБОУ ВО «МГТУ им. Н.Э. Баумана (НИУ)»



Просовский Юрий Олегович, студент 1 курса магистратуры ФГБОУ ВО «МГТУ им. Н.Э. Баумана (НИУ)»

Готовится к выходу книга «Утилитарное наружное освещение»

В настоящее время готовится к выходу в свет книга А.А. Коробко «Утилитарное наружное освещение», посвящённая 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 переадаптации 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.

Заказать книгу можно в Редакции журнала «Светотехника», направив заявку на адрес электронной почты bulgakova@l-e-journal.com. Заявки на издание принимаются до 30 сентября 2020 года. Выпуск книги запланирован на IV квартал текущего года, её ориентировочная цена не превысит 700 рублей.

А.А. КОРОБКО

УТИЛИТАРНОЕ НАРУЖНОЕ ОСВЕЩЕНИЕ

Москва
Редакция журнала «Светотехника»
2020

Описание дифракции Фраунгофера в приближении теории светового поля

В.П. БУДАК, Д.С. ЕФРЕМЕНКО, П.А. СМИРНОВ

НИУ «МЭИ», Москва
E-mail: budakvp@gmail.com

Аннотация

Длина волны есть естественный масштаб, который разделяет области применимости лучевой и волновой моделей света. Если изменение пространственной плотности потока излучения существенно в масштабе длины волны, то имеет место явление дифракции света, описываемое волновой оптикой. В дифракции на диафрагме можно выделить ближнюю зону, с существенной неоднородностью волны (зона Френеля), и дальнюю (зона Фраунгофера), где волна становится близкой к однородной (квазиоднородной) и возможно лучевое описание. Проблема заключается в том, что яркости лучей до и после диафрагмы не связаны друг с другом. В настоящей статье предлагается метод определения граничных условий для яркости лучей в зоне Фраунгофера через яркость лучей, падающих на диафрагму. Данный подход допускает обобщение определения яркости полей в зоне Фраунгофера и в других задачах оптики, открывая возможности использования эффективных лучевых методов для определения световых полей.

Ключевые слова: дифракция, геометрическая оптика, волновая оптика, квазиоднородность.

Введение

Дифракция считается одним из главных проявлений волновой природы света [1]. Однако сегодня это относится, скорее всего, к школьному курсу физики, где принято антагонистично противопоставлять волновые и лучевые представления о свете. Любое физическое явление или объект мы изучаем с помощью некоторого зонда, тестера или пробного приёмника, но в классической физике считалось, что последний всегда можно сделать пренебрежимо малым и сформулировать свойства самого объекта. С возникновением и развитием квантовой механики стало очевидным, что мы никогда не выходим за пределы описания взаимодействия тестер – объект, и в любом физическом явлении есть некоторый такой масштаб, что попытка сделать приёмник меньше него сразу разрушает установившуюся картину.

Особенностью оптики является то, что в ней существуют два типа приёмников: квадратичный, реагирующий на поглощённую им энергию, и линейный (типа антенны), реакция которого пропорциональна напряжённости поля. Соответственно, каждый из процессов измерений порождает своё поле. Порождаемое квадратичным приёмником поле будем называть световым или лучевым, а порождаемое линейным – волновым [2]. Световое поле представляет собой лучи всевозможных направлений, по которым протекает поток с пространственной плотностью $L(\mathbf{r}, \mathbf{l}, t)$ – яркость светового поля в точке \mathbf{r} в момент вре-

мени t в направлении $\hat{\mathbf{l}}$, а волновое поле характеризуется пространственно-временным распределением вектора напряжённости $\mathbf{E}(\mathbf{r}, t)$, и его структура представима в виде суперпозиции случайных волн в пространстве.

Поскольку энергия – величина квадратичная относительно напряжённости поля, то, вообще говоря, все свойства светового поля выразимы через свойства волнового. Но реально в оптическом диапазоне существуют только квадратичные приёмники. Линейный приёмник можно создать, разместив перед квадратичным некоторое оптическое устройство, например, диафрагму. Если размеры диафрагмы меньше некоторого масштаба λ , то поле после диафрагмы – волновое, однако измерять его значения мы всё равно сможем только квадратичным приёмником. В простейшем случае однородной монохроматической волны λ есть её длина.

Если амплитуда (напряжённость) волнового поля и плотность энергии (мощности) светового поля не меняются в пространстве, то поле называется однородным и обе модели описания, по сути, эквивалентны друг другу: в каждой точке пространства луч перпендикулярен фронту волны, который выступает функцией описания всех возможных траекторий лучей. Если же поле становится неоднородным, особенно в случае, когда масштаб изменения поля становится порядка и менее λ , то лучевое описание делается невозможным. Собственно, в узком смысле слова, это явление и принято называть дифракцией.

Поле дифрагированной волны сразу за диафрагмой представимо в виде суперпозиции [1] сильно неоднородной компоненты, убывающей с расстоянием r от диафрагмы быстрее, чем $1/r$, с квазиоднородной медленно меняющейся в масштабе λ и убывающей как $1/r$. Поэтому у диафрагмы поле сильно неоднородно (зона Френеля), но с некоторого расстояния возникает зона Фраунгофера, где волна уже опять квазиоднородна и допускает лучевую трактовку. В общем случае картину поля после дифракции на круглой диафрагме радиуса a можно представить в виде рис. 1.

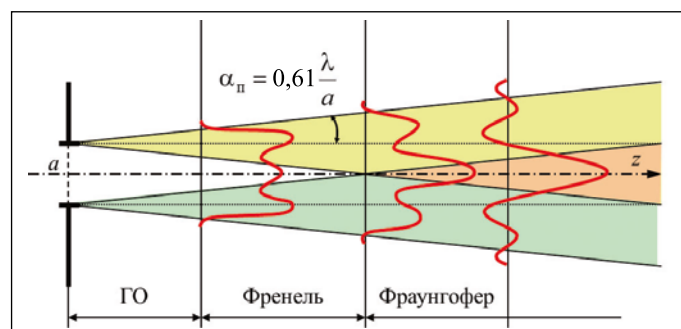
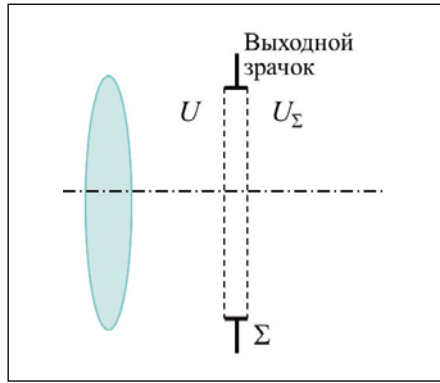


Рис. 1. Зависимость распределения облучённости (красная линия) от расстояния от отверстия диафрагмы z

Рис. 2. Выходной зрачок оптической системы



Далее, в основу анализа положим представление, что дифракция порождает на каждой точке диафрагмы расходящийся пучок с углом расходимости $\alpha_n \sim \lambda/a$, соответствующим первому минимуму кружка рассеяния Эйри [1]. Если перекрытие «пятен» пучков на расстоянии z от отверстия диафрагмы $z\alpha_n \approx z\lambda/a \ll a$, то влияние дифракции пренебрежимо мало и поле допускает лучевую трактовку, где яркость лучей, прошедших через диафрагму, равна яркости падающего излучения. При значительном перекрытии «пятен» $z\lambda/a \approx a$, что соответствует зоне Френеля, поле определяется интерференцией пучков от каждой точки диафрагмы, становится существенно неоднородным, и лучевое описание становится невозможным. В зоне Фраунгофера, $z\lambda/a \gg a$, пучки от каждой точки диафрагмы сильно перемешаны, поле становится квазиоднородным, и вновь возможно лучевое описание. Однако яркость лучей в этой зоне определяется уже не яркостью падающих лучей, а законами дифракции.

Проблема состоит в том, что связь лучей до диафрагмы и после неочевидна и может определяться только через свойства волнового поля сразу за диафрагмой [3]. Задача настоящей статьи – получить связь между пространственно-угловыми распределениями яркости, $L(\mathbf{r}, \hat{\mathbf{l}})$, стационарных световых полей до и после диафрагмы.

Дифракция волны на выходном зрачке оптической системы

По принципу Аббе (*Abbe Ernst*, 1840–1905) [5], структуру оптического изображения можно исследовать в приближении геометрической оптики (ГО) с анализом дифракции волны на выходном зрачке. Рассмотрим резкое изображение от точки на оптической оси. Поскольку в плоскости анализа мы должны иметь сходящуюся в точку изображения сферическую волну, то волна в этой плоскости анализа квазиоднородна.

Пусть комплексная амплитуда волны, прошедшей через оптическую систему (ОС), в плоскости выходного зрачка есть $U(\mathbf{r})$, где \mathbf{r} – радиус-вектор в плоскости выходного зрачка Σ (рис. 2). Тогда поле сразу после зрачка выразим через зрачковую функцию $\Theta(\mathbf{r})$:

$$U_{\Sigma}(\mathbf{r}) = \Theta(\mathbf{r})U(\mathbf{r}), \text{ где } \Theta(\mathbf{r}) = \begin{cases} 1, & \mathbf{r} \in \Sigma, \\ 0, & \mathbf{r} \notin \Sigma. \end{cases}$$

Отсюда следует выражение для корреляционной функции поля сразу за выходным зрачком:

$$\Gamma_{\Sigma}(\mathbf{r}_1, \mathbf{r}_2) = \langle U_{\Sigma}(\mathbf{r}_1)U_{\Sigma}^*(\mathbf{r}_2) \rangle = \Theta(\mathbf{r}_1)\Theta(\mathbf{r}_2)\langle U(\mathbf{r}_1)U^*(\mathbf{r}_2) \rangle = \Theta(\mathbf{r}_1)\Theta(\mathbf{r}_2)\Gamma_o(\mathbf{r}_1, \mathbf{r}_2),$$

где $\Gamma_o(\mathbf{r}_1, \mathbf{r}_2)$ – корреляционная функция прошедшего через ОС излучения на плоскости выходного зрачка.

Перейдём к локальным координатам в плоскости выходного зрачка Σ :

$$\mathbf{R} = \frac{\mathbf{r}_1 + \mathbf{r}_2}{2}, \quad \boldsymbol{\rho} = \mathbf{r}_1 - \mathbf{r}_2, \quad \mathbf{r}_1 = \mathbf{R} + \frac{\boldsymbol{\rho}}{2}, \quad \mathbf{r}_2 = \mathbf{R} - \frac{\boldsymbol{\rho}}{2}, \text{ что приводит к выражению}$$

длит к выражению

$$\Gamma_{\Sigma}(\mathbf{R}, \boldsymbol{\rho}) = \Gamma_o(\mathbf{R}, \boldsymbol{\rho})\Theta\left(\mathbf{R} + \frac{\boldsymbol{\rho}}{2}\right)\Theta\left(\mathbf{R} - \frac{\boldsymbol{\rho}}{2}\right). \quad (1)$$

Наше предположение возможности расчёта поля до выходного зрачка в лучевом приближении эквивалентно допущению квазиоднородности поля, что позволяет выразить $\Gamma_o(\mathbf{R}, \boldsymbol{\rho})$ через обобщённую яркость в форме спектра Вигнера [3, 4]:

$$\Gamma_o(\mathbf{R}, \boldsymbol{\rho}) = \oint L_o(\mathbf{R}, \hat{\mathbf{l}})e^{-i\hat{\mathbf{l}}\boldsymbol{\rho}}d\hat{\mathbf{l}}, \text{ где } L_o(\mathbf{R}, \hat{\mathbf{l}}) \text{ – яркость излучения, прошедшего ОС, в плоскости выходного зрачка.}$$

Тогда яркость квазиоднородной части поля после выходного зрачка, которое формирует изображение в плоскости анализа, выражается согласно [3]:

Тогда яркость квазиоднородной части поля после выходного зрачка, которое формирует изображение в плоскости анализа, выражается согласно [3]:

$$L(\mathbf{R}, \mathbf{l}'_{\perp}) = \left(\frac{k}{2\pi}\right)^2 l_z \int \Gamma_{\Sigma}(\mathbf{R}, \boldsymbol{\rho})e^{i\mathbf{k}'_{\perp}\boldsymbol{\rho}}d^2\rho, \quad (2)$$

где \mathbf{l}'_{\perp} – вектор проекции вектора направления $\hat{\mathbf{l}}$ на плоскость изображения; l_z – проекция вектора $\hat{\mathbf{l}}$ на нормаль к плоскости изображения; $\hat{\mathbf{l}}$, согласно (рис. 3), выражается как

$$\hat{\mathbf{l}} = \frac{\mathbf{r}_{\perp} - (\mathbf{R}_{\perp} + R\hat{\mathbf{z}})}{\sqrt{(\mathbf{r}_{\perp} - \mathbf{R}_{\perp})^2 + R^2}}.$$

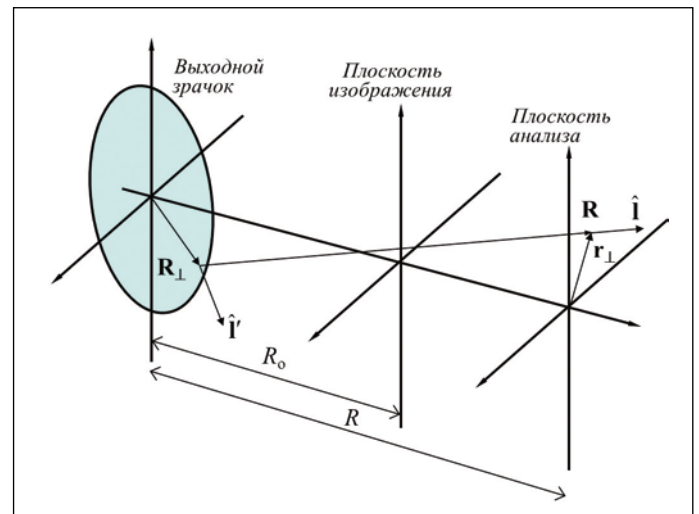
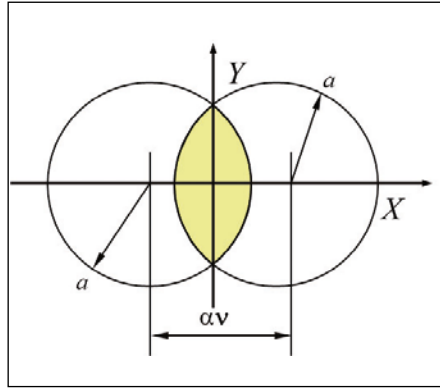


Рис. 3. Схема формирования изображения в оптической системе, ограниченной дифракцией

Рис. 4.
К определению
пределов
интегрирования
в выражении (10)



Подставив (1) в (2), получим выражение

$$L(\mathbf{R}, \mathbf{l}'_{\perp}) = \left(-\frac{k}{2\pi}\right)^2 l_z \oint L_o(\mathbf{R}, \hat{\mathbf{l}}) \int \Theta\left(\mathbf{R} + \frac{\mathbf{p}}{2}\right) \Theta \times \\ \times \left(\mathbf{R} - \frac{\mathbf{p}}{2}\right) \exp(-ik(\mathbf{l}'_{\perp} - \mathbf{l}_{\perp})\mathbf{p}_{\perp}) d^2\rho d\hat{\mathbf{l}}. \quad (3)$$

Введя функцию

$$h(\mathbf{l}'_{\perp} - \mathbf{l}_{\perp}) = \left(\frac{k}{2\pi}\right)^2 \left(\frac{l_z}{l'_z}\right) \\ \int \Theta\left(\mathbf{R} + \frac{\mathbf{p}}{2}\right) \Theta\left(\mathbf{R} - \frac{\mathbf{p}}{2}\right) \exp(-ik\mathbf{p}(\mathbf{l}'_{\perp} - \mathbf{l}_{\perp})) d^2\rho, \quad (4)$$

перепишем выражение (3) в виде интеграла свёртки:

$$L(\mathbf{R}, \mathbf{l}'_{\perp}) = \int L_o(\mathbf{R}, \mathbf{l}_{\perp}) h(\mathbf{l}'_{\perp} - \mathbf{l}_{\perp}) d^2l_{\perp}.$$

Тем самым дифракция волны на выходном зрачке приобретает простой лучевой смысл рассеяния света, причём $h(\mathbf{l}'_{\perp} - \mathbf{l}_{\perp})$ является функцией рассеяния света.

Оптическая передаточная функция идеальной оптической системы

Для проверки полученных соотношений рассмотрим оптическую передаточную функцию (ОПФ) безабберационного тонкого объектива, оправка которого является и выходным зрачком, при наличии расфокусировки. Расчёт ОПФ такой системы хорошо известен из волновой оптики [1]. Для этого в качестве источника рассмотрим точечный изотропный источник с силой света I_o на оптической оси, имеющий стигматическое изображение в плоскости анализа на расстоянии R_o по оптической оси от плоскости выходного зрачка (рис. 3). Распределение облучённости от него является функцией рассеяния точки (ФРТ), преобразование Фурье от которой есть искомая ОПФ. Яркость луча в плоскости диафрагмы при этом может быть выражена как

$$L_o(\mathbf{R}_{\perp}, \mathbf{l}'_{\perp}) = I_o \delta\left(\mathbf{l}'_{\perp} + \frac{\mathbf{R}_{\perp}}{R_o}\right). \quad (5)$$

Подставим (5) в (3) и преобразуем полученное соотношение к координатам $\mathbf{R}_{\perp}, \mathbf{l}_{\perp}$:

$$L_{\Sigma}(\mathbf{R}_{\perp}, \mathbf{l}_{\perp}) = I_o \left(\frac{k}{2\pi}\right)^2 \left(\frac{l_z}{l'_z}\right) \times \\ \times \int \Theta\left(\mathbf{R}_{\perp} + \frac{\mathbf{p}}{2}\right) \Theta\left(\mathbf{R}_{\perp} - \frac{\mathbf{p}}{2}\right) \exp\left\{ik\mathbf{p}\left(\mathbf{l}_{\perp} + \frac{\mathbf{R}_{\perp}}{R_o}\right)\right\} d^2\rho. \quad (6)$$

Здесь учтены следующие геометрические соотношения (рис. 3):

$$\mathbf{l}_{\perp} \approx \frac{\mathbf{r}_{\perp} - \mathbf{R}_{\perp}}{R}, \quad \mathbf{l}_{\perp} + \frac{\mathbf{R}_{\perp}}{R_o} = \frac{\mathbf{r}_{\perp}}{R} + \beta \frac{\mathbf{R}_{\perp}}{R}, \\ \beta = \frac{R - R_o}{R_o}, \quad d^2l_{\perp} \approx \frac{d^2R}{R^2}.$$

Выражение для облучённости в плоскости анализа имеет вид

$$E(\mathbf{r}_{\perp}) = \int_{(\Omega_{\perp})} L_{\Sigma}(\mathbf{r}_{\perp}, \mathbf{l}_{\perp}) l_z d\hat{\mathbf{l}} = \int_{(\Omega_{\perp})} L_{\Sigma}(\mathbf{r}_{\perp}, \mathbf{l}_{\perp}) l_z d^2l$$

и с учётом (6) принимает форму

$$E(\mathbf{r}_{\perp}) = \frac{I_o}{R^2} \left(\frac{k}{2\pi}\right)^2 \int \Theta\left(\mathbf{R}_{\perp} + \frac{\mathbf{p}}{2}\right) \Theta\left(\mathbf{R}_{\perp} - \frac{\mathbf{p}}{2}\right) \times \\ \times \exp\left\{ik\mathbf{p}\left(\frac{\mathbf{r}_{\perp}}{R} + \beta \frac{\mathbf{R}_{\perp}}{R}\right)\right\} d^2\rho d^2R_{\perp}, \quad (7)$$

где учтено, что в условиях параксиальной оптики можно считать $l_z/l'_z \approx 1$.

ОПФ ОС есть преобразование Фурье от распределения облучённости:

$$H(\mathbf{v}) = \int E(\mathbf{r}_{\perp}) e^{-i\mathbf{v}\mathbf{r}_{\perp}} d^2r_{\perp},$$

что после подстановки выражения (7) преобразуется к виду

$$H(\mathbf{v}) = \frac{I_o}{R^2} \left(\frac{k}{2\pi}\right)^2 \int \Theta\left(\mathbf{R}_{\perp} + \frac{\mathbf{p}}{2}\right) \Theta\left(\mathbf{R}_{\perp} - \frac{\mathbf{p}}{2}\right) \times \\ \times \exp\left\{ik\mathbf{p}\left(\frac{\mathbf{r}_{\perp}}{R} + \beta \frac{\mathbf{R}_{\perp}}{R}\right) - i\mathbf{v}\mathbf{r}_{\perp}\right\} d^2r_{\perp} d^2\rho d^2R_{\perp}. \quad (8)$$

Отметим очевидное соотношение

$$\delta\left(\frac{k\mathbf{p}}{R} - \mathbf{v}\right) = \int \exp\left\{i\mathbf{r}_{\perp}\left(\frac{k\mathbf{p}}{R} - \mathbf{v}\right)\right\} d^2r_{\perp}, \quad (9)$$

позволяющее преобразовать (8) к виду

$$H(\mathbf{v}) = I_o \int \Theta\left(\mathbf{R}_{\perp} + \frac{\alpha\mathbf{v}}{2}\right) \Theta\left(\mathbf{R}_{\perp} - \frac{\alpha\mathbf{v}}{2}\right) \exp(i\beta\mathbf{v}\mathbf{R}_{\perp}) d^2R_{\perp},$$

где с учётом (9) определена константа α :

$$\alpha = \frac{R}{k} = \frac{\lambda R}{2\pi}.$$

Вычислим ОПФ ОС для нулевой пространственной частоты:

$$H(0) = I_o \int \Theta(\mathbf{R}_{\perp}) d^2R_{\perp} = \pi a^2 I_o,$$

что соответствует пропусканью ОС.

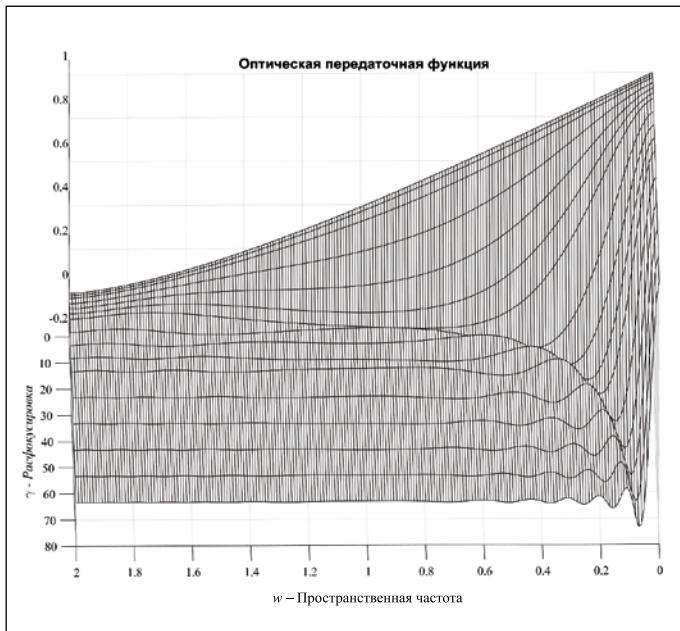


Рис. 5. Влияние расфокусировок на ОПФ идеальной оптической системы, ограниченной дифракцией

Тогда относительную ОПФ (модуляционную передаточную функцию) ОС можно представить в форме

$$T(\mathbf{v}) = \frac{H(\mathbf{v})}{H(0)} = \frac{1}{\pi a^2} \int \Theta\left(\mathbf{R}_\perp + \frac{\alpha \mathbf{v}}{2}\right) \Theta \times \left(\mathbf{R}_\perp - \frac{\alpha \mathbf{v}}{2}\right) \exp(i\beta \mathbf{v} \mathbf{R}_\perp) d^2 R_\perp. \quad (10)$$

Рассмотрим влияние расфокусировок на ОПФ системы. Из рис. 4 следует очевидное соотношение

$$\left(x - \frac{\alpha \mathbf{v}}{2}\right)^2 + y^2 = a^2,$$

что позволяет определить пределы интегрирования в выражении (10) как

$$x_1 = \frac{\alpha \mathbf{v}}{2} - \sqrt{a^2 - y^2}, \quad x_2 = -\frac{\alpha \mathbf{v}}{2} + \sqrt{a^2 - y^2}, \quad y_{12} = \pm \sqrt{a^2 - \frac{\alpha^2 \mathbf{v}^2}{4}}$$

и переписать (10) как

$$T(\mathbf{v}) = \frac{2}{\pi a^2} \int_0^{\sqrt{a^2 - \left(\frac{\alpha \mathbf{v}}{2}\right)^2}} \int_{\frac{\alpha \mathbf{v}}{2} - \sqrt{a^2 - y^2}}^{-\frac{\alpha \mathbf{v}}{2} + \sqrt{a^2 - y^2}} e^{i\beta \mathbf{v} x} dx dy.$$

Интеграл по dx легко вычисляется:

$$T(\mathbf{v}) = \frac{2}{\pi a^2} \int_0^{\sqrt{a^2 - \left(\frac{\alpha \mathbf{v}}{2}\right)^2}} \sin\left[\beta \mathbf{v} \left(\sqrt{a^2 - y^2} - \frac{\alpha \mathbf{v}}{2}\right)\right] dy.$$

Если перейти к безразмерным переменным

$$w = \frac{\alpha \mathbf{v}}{a} = \frac{R \mathbf{v}}{a k} = \frac{R \mathbf{v}}{\zeta}, \quad t = \frac{y}{a},$$

$$\gamma = \frac{\beta a^2}{\alpha} = \frac{\beta k a^2}{R} = \beta \zeta \frac{a}{R} \quad \text{и} \quad \zeta = k a = \frac{2\pi a}{\lambda},$$

то этот интеграл приобретает более простой для анализа вид

рассмотрим более простой для анализа вид

$$T(w) = \frac{4}{\pi \gamma w} \int_0^{\sqrt{1 - \left(\frac{w}{2}\right)^2}} \sin\left[\gamma w \left(\sqrt{1 - t^2} - \frac{w}{2}\right)\right] dt. \quad (11)$$

На рис. 5 представлены графики ОПФ при разных значениях относительной расфокусировки γ .

Отметим, что в отсутствие расфокусировки, что эквивалентно $\beta \rightarrow 0$ и, соответственно, $\gamma \rightarrow 0$, а также

$$\lim_{\gamma \rightarrow 0} \frac{1}{\gamma w} \sin\left[\gamma w \left(\sqrt{1 - t^2} - \frac{w}{2}\right)\right] = \sqrt{1 - t^2} - \frac{w}{2},$$

выражение (11)

переходит в выражение для ОПФ ОС с дифракцией на выходном зрачке

$$T(w) = \frac{4}{\pi} \int_0^{\sqrt{1 - \left(\frac{w}{2}\right)^2}} \left(\sqrt{1 - t^2} - \frac{w}{2}\right) dt = \frac{2}{\pi} \left[\arccos \frac{w}{2} - \frac{w}{2} \sqrt{1 - \frac{w^2}{4}} \right], \quad (12)$$

которое полностью соответствует выражению, получаемому по дифракционной теории [6–8].

В статье [7] для выражения (12) дано представление через функции Бесселя, что позволяет получить асимптотику для $T(w)$ для больших расфокусировок γ . Нетрудно видеть, что при значительных расфокусировках роль дифракционного размытия становится пренебрежимо мала, функция размытия точки определяется посредством ГО и пятно размытия представляет собой равномерно засвеченный круг. В этом случае ОПФ как преобразование Фурье от равномерно светящегося круга представляет собой функцию Бесселя первого рода от своего аргумента.

Заключение

Как видим, сформулированный метод определения связи яркости световых полей до диафрагмы и в зоне Фраунгофера после диафрагмы позволяет описывать все явления формирования изображения в идеальной ОС. Поэтому при анализе изображения в ОС можно использовать эффективный лучевой подход, в котором диафрагмы заменяются рассеивающими элементами с функцией рассеяния точки (ФРТ) по выражению (4). Более того, поскольку зона Фраунгофера представляет значительный практический интерес, то данный подход может быть обобщён и развит для других задач. Например, сегодня

рассеяние на частицах сложной формы считают не по теории Г. Ми [9], а на основе геометрической оптики, что приводит к пренебрежению волновыми эффектами (дифракция, поверхностная волна и краевой эффект). Определение новых граничных условий для рассеянных лучей в зоне Фраунгофера позволит включить и эти эффекты в методы лучевой оптики.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Борн М., Вольф Э. Основы оптики. – М.: Наука, 1973. – 720 с.
2. Будаков В.П. Теория светового поля / Разд. 2.1 в кн.: Справочная книга по светотехнике. Под общ. ред. Ю.Б. Айзенберга и Г.В. Бооса. – М.: Редакция журнала «Светотехника», 2020. – 829 с.
3. Апресян Л.А., Кравцов Ю.А. Теория переноса излучения: Статистические и волновые эффекты. – М.: Наука, 1983. – 216 с.
4. Wigner E. On quantum corrections for thermodynamic equilibrium // Phys. Rev. – 1932. – Vol. 40, No. 6. – P. 749–759.
5. Abbe E. Beitrage zur Theorie des Mikroskops und der mikroskopischen Wahrnehmung // Archiv f. Mikroskopische Anat. – 1873. – В. 9. – S. 413.
6. Hopkins H.H. On the Diffraction Theory of Optical Images // Proc. R. Soc. Lond. A. – 1953. – Vol. 217. – P. 408–432.
7. Hopkins H.H. The Frequency Response of a Defocused Optical System // Proc. R. Soc. Lond. A. – 1955. – Vol. 231. – P. 91–103.
8. Steel W.H. The Defocused Image of Sinusoidal Gratings // Optica Acta: International Journal of Optics. – 1956. – Vol. 3, No. 2. – P. 65–74.
9. Mie G. Beiträge zur Optik trüber Medien, speziell kolloidaler Metallösungen // Annalen der Physik. – 1908. – В. 330. – S. 377–445.



Будаков 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



Ефременко Дмитрий Сергеевич, доктор техн. наук. Окончил в 2009 г. МЭИ. Научный сотрудник Института дистанционного зондирования (IMF) Германского аэрокосмического центра (DLR) в Оберпфaffenхофене, Германия, доцент Мюнхенского технического университета. Область научных интересов: перенос излучения, дистанционное зондирование, анализ больших данных



Смирнов Павел Александрович, кандидат техн. наук. Окончил в 2001 г. кафедру «Светотехника» МЭИ. Доцент кафедры «Светотехника» НИУ «МЭИ». Область научных интересов: теория светового поля, перенос излучения в атмосфере, естественное освещение, зрительное восприятие

Физики создали линзу из метаматериала, которые может сжимать пучки света в структуры шириной несколько нанометров, которые «нарушают» классические законы оптики. Об этом пишет пресс-служба МФТИ со ссылкой на журнал «*Optics Letters*».

Наночастицы из диэлектриков и тонкие полоски из некоторых металлов, к примеру золота или серебра, могут поглощать видимый свет, передавать его дальше и повторно излучать в виде других форм электромагнитных волн. Это возможно благодаря так называемым поверхностным плазмонам – коллективным колебаниям электронов, которые могут поглощать и испускать энергию в виде световых волн.

За последние десять лет открыты десятки примеров того, что подобные структуры действительно существуют – например, во многих красках и шедеврах искусства, созданных ещё во времена античности и средневековья. Кроме того, физики придумали, как применять знания об этих структурах на практике.

Например, шесть лет назад учёные из Массачусетского технологического института создали на основе плазмонов прозрачный цветной дисплей, а их коллеги приспособили эти структуры для создания устройств, которые могут скрывать объекты от СВЧ или ИК радаров.

Учёные из России и Дании приспособили плазмоны для решения одной из самых важных проблем, которая мешает использовать свет в качестве переносчика информации внутри микропроцессоров компьютеров и других вычислительных устройств. Дело в том, что из-за дифракции света – явления, в ходе которого волны света огибают препятствия размером менее половины длины световой волны, световые аналоги транзисторов не могут быть меньше 200 нм для видимого света и около 500 нм для ИК излучения.

Ещё пять лет назад в МФТИ показали, что этого можно добиться, сжав свет с помощью источников плазмонных колебаний и так называемых поляритонов – квазичастиц, которые одновременно ведут себя и как волна, и как частица. Сейчас физики из России и Дании решили эту задачу на практике, создав своеобразную линзу, которая может «сжимать» пучок света до наноразмеров с помощью плазмонов и поляритонов.

Этот прибор, так называемая металинза, представляет собой квадратный блок из материала, который не проводит электрический ток, размерами 5 на 5 мкм и толщиной в 250 нм. Она прикреплена к плёнке из золота, на обратную поверхность которой также нанесена дифракционная решётка. Учёные подобрали их размеры таким образом, что они сжимают падающий на них пучок света до 60 % от длины его волны.

Подобная структура, как объясняют учёные, позволяет линзе из метаматериалов не только сжимать свет, но и фокусировать его и манипулировать его движением благодаря формированию так называемой плазмонной наноструи, существование которой российские исследователи впервые смогли подтвердить экспериментально.

Создание металинзы, как считают авторы статьи, открывает дорогу для разработки полноценных фотонных чипов и появления первых световых компьютеров уже в ближайшем будущем. Этому, в частности, может помочь то, что подобные наноструктуры можно «печатать» с помощью уже существующих литографических технологий.

nanonewsnet.ru
23.06.2020

Новые правила доступа светотехнической продукции на рынок ЕАЭС: соответствие четырём техническим регламентам

Т.А. РОЖКОВА¹, Е.А. СЫСОЕВА²

¹ Центр сертификации электрических ламп и светотехнических изделий, Саранск

² Национальный исследовательский Мордовский государственный университет им. Н.П. Огарёва, Саранск
E-mail: sysoewa@mail.ru

Аннотация

В статье рассматриваются новые технические регламенты Евразийского экономического союза: «О требованиях к энергетической эффективности энергопотребляющих устройств» (ТР ЕАЭС 048/2019) и «Об ограничении применения опасных веществ в изделиях электротехники и радиоэлектроники» (ТР ЕАЭС 037/2016), которые устанавливают единые требования к энергопотребляющей и содержащей регламентируемые (опасные) вещества продукции, в том числе светотехнической. Показано, что соответствие светотехнической продукции уже действующим и вновь вводимым техническим регламентам при её изготовлении и осуществлении процедуры оценки соответствия позволит защитить евразийский рынок от некачественных, небезопасных и энергонезэффективных изделий.

Ключевые слова: светотехническая продукция, энергетическая эффективность, ресурсосбережение, Евразийский экономический союз, технический регламент, оценка соответствия, безопасность, классы энергетической эффективности, стандарты, этикетка, директивы и регламенты Европейского союза.

Введение

Условием доступа продукции на рынок стран Евразийского экономического союза (ЕАЭС, Союз) является соответствие поставляемой продукции требованиям технического законодательства ЕАЭС, руководствуясь которым продукция выпускается в обращение на территории Союза только при её соответствии требованиям технических регламентов (ТР) ЕАЭС (ТР Таможенного союза). Соответствие продукции требовани-

ям ТР осуществляется через процедуру оценки соответствия требованиям ТР, действие которых распространяется на неё с целью получения установленных в ЕАЭС разрешительных документов: сертификатов соответствия и деклараций о соответствии, имеющих равную юридическую силу и права нанесения знака соответствия – маркировки ЕАС. Продукция, не прошедшая процедуру оценки соответствия требованиям ТР, действие которых на неё распространяется, не должна маркироваться единым знаком обращения на рынке Союза и не допускается к выпуску в обращение на его территории. Такая система технического регулирования в ЕАЭС не только позволяет защитить внутренний рынок Союза от некачественной, небезопасной и энергонезэффективной продукции, но и способствует развитию экспортного потенциала и продвижения продукции на рынки других стран.

Новые технические регламенты: требования к энергоэффективности и содержанию опасных веществ в светотехнических изделиях

Процесс установления единых требований и правил доступа светотехнической продукции на российский рынок начался с вступлением в силу 15 февраля 2013 г. двух ТР [1, 2], применяемых при подтверждении соответствия в форме сертификации с оценкой по электрической и пожарной безопасности, а также по электромагнитной совместимости. Начиная с 2016 г., при оценке соответствия светотехнической продукции этим ТР дополнительно включены требования по фотобиологической безопасности и по ограничениям, связанным с воздействием на человека электромагнитных полей.

В марте 2018 г. был введён в действие ТР [3], устанавливающий новые требования к изделиям электротехники и радиоэлектроники в части ограничения применения вредных веществ в их составе при разработке и изготовлении. Согласно данному ТР, в перечень изделий, на которые распространяется его действие, включены «источники света и оборудование световое, включая оборудование, встраиваемое в мебель», для которых установлены специальные требования по ограничению применения опасных веществ – ртути и свинца. Содержание данного ТР максимально гармонизировано с международными нормами и правилами, в том числе с законодательством Европейского союза (ЕС) по ограничению использования опасных веществ в электрическом и электронном оборудовании, согласно директиве ЕС [4].

Учитывая необходимость большой подготовительной работы в связи с введением в действие ТР [3], решением Коллегии Евразийской экономической комиссии (ЕЭК) от 28 февраля 2017 г. № 24 утверждены переходные положения данного ТР, в соответствии с которыми до 1 марта 2020 г. допускать производство и выпуск в обращение изделий электротехники и радиоэлектроники, в том числе светотехнических, без осуществления оценки соответствия и документов об оценке соответствия требованиям регламента. Такой подход с отсрочкой введения в действие ТР [3] в части проведения оценки соответствия изделий требованиям данного ТР был необходим для осуществления подготовительных работ к исполнению требований ТР органами по сертификации, аккредитованными испытательными лабораториями и импортёрами изделий. Таким образом, начиная с 1 марта 2020 г. для доступа на рынок ЕАЭС светотехническая продукция, перечень которой приведён в ТР [3], должна проходить процедуру оценки соответствия и выпускаться на рынок Союза только при условии соответствия нормам этого ТР, а также требованиям ТР [1, 2].

В целях обеспечения энергетической эффективности и ресурсосбережения в рамках ЕАЭС, а также в целях предупреждения действий, вводящих в заблуждение потребителей

относительно энергетической эффективности энергопотребляющих устройств, 8 августа 2019 г. Советом ЕЭК принят ТР [5], устанавливающий требования к энергоэффективности и ресурсосбережению энергопотребляющих устройств, в число которых входит светотехническая продукция. ТР [5] вступает в силу 1 сентября 2021 г. Новый ТР сможет предупредить действия недобросовестных предпринимателей, которые вводят потребителей в заблуждение относительно энергетической эффективности энергопотребляющих устройств. Новым ТР устанавливаются классы энергоэффективности энергопотребляющих устройств, причём для лучшего информирования покупателей такие устройства будут снабжены специальными этикетками и техническими листами, содержащими сведения об их энергетической эффективности. Энергопотребляющие устройства будут выпускаться на рынок Союза только при условии соответствия нормам ТР [5] и требованиям других ТР, которые на них распространяются, и прохождения процедуры оценки соответствия. Такая продукция получает право маркироваться единым знаком обращения продукции на рынке ЕАЭС. В соответствии с решением Совета ЕЭК намечено поэтапное введение в действие отдельных требований ТР [5], что позволит обеспечить плавный переход производителей энергопотребляющих устройств на единые обязательные требования.

Требования к энергетической эффективности конкретных видов энергопотребляющих устройств сформулированы в 19 приложениях к ТР [5], из которых три касаются светотехнических изделий:

- ламп электрических;
- люминесцентных ламп без встроенного ПРА, газоразрядных ламп ВД, ПРА и светильников для таких ламп;
- ламп направленного света, светодиодных ламп и связанного с ними оборудования.

Приложения к ТР [5] на лампы, ПРА и светильники для таких ламп содержат необходимые термины и их определения, требования к идентификации изделий, маркировке, эксплуатационным документам, оценке соответствия и энергетической эффективности, содержат информацию

о допустимых отклонениях параметров энергетической эффективности ламп электрических, люминесцентных ламп без встроенного ПРА, газоразрядных ламп ВД, ПРА и светильников для таких ламп, ламп направленного света, светодиодных ламп и связанного с ними оборудования при проведении испытаний (измерений) после их выпуска в обращение, включают требования к содержанию этикеток и технических листов, устанавливают классы энергоэффективности ламп.

Согласно ТР [5] требование к содержанию информации о классе энергетической эффективности в технической документации, прилагаемой к этим товарам, в их маркировке и на их этикетках распространяется на следующие выпускаемые в обращение на таможенной территории ЕАЭС лампы:

- электрические лампы ненаправленного света бытового и аналогичного назначения, которые также могут применяться для других целей помимо освещения или встраиваемые в другие электрические энергопотребляющие устройства;

- люминесцентные лампы без встроенного ПРА, газоразрядные лампы ВД, ПРА и светильники для таких ламп, также если они встроены в другую энергопотребляющую продукцию;

- как отдельные, так и встраиваемые в другие изделия лампы направленного света, светодиодные лампы, а также связанное с ними оборудование, предназначенное для установки между сетью электропитания и лампами, включая ПРА ламп, устройства управления и светильники.

Для обозначения ламп с наивысшей энергетической эффективностью применяются классы энергетической эффективности «А+» и «А++», класс «Е» приводится как наименее эффективный, а применяемые ранее классы с наименьшей энергетической эффективностью ламп «F» и «G» в ТР отсутствуют.

В таблице в качестве примера приведены классы энергетической эффективности ламп электрических, определяемые в соответствии с индексом энергетической эффективности (*EEI*), который рассчитывается по методике, изложенной в ТР [5].

ТР [5] определяет новые требования к энергоэффективности и эксплу-

атационным характеристикам ламп и светильников, которые, в зависимости от их вида, будут вводиться поэтапно, начиная с 1 сентября 2021 г., и далее ежегодно, с отсрочкой введения завершающего этапа до 1 сентября 2024 г. Такое поэтапное введение требований к характеристикам изделий позволит предприятиям-изготовителям светотехнической продукции провести сравнительный анализ действительных значений параметров энергоэффективности и эксплуатационных характеристик, достигнутых в производстве и установленных в нормативно-технической документации (НД), с параметрами, регламентируемыми ТР [5]. По результатам проведённого анализа предприятиям необходимо будет осуществить комплекс работ по внесению соответствующих изменений в НД, если показатели, достигнутые в производстве, не ниже нормируемых ТР, или довести характеристики изделий до уровня, установленного ТР [5], с последующей актуализацией НД с целью её приведения в соответствие с требованиями данного ТР.

До даты вступления в силу ТР [5], т.е. до 1 сентября 2021 г., Совет ЕЭК должен утвердить перечень стандартов, содержащий правила и методы исследований (испытаний) и измерений, в том числе правила отбора образцов, необходимые для применения и исполнения требований данного ТР и осуществления оценки соответствия. В настоящее время ведётся общественное обсуждение проекта перечня стандартов с участием заинтересованных лиц (на защиту интересов которых направлена разработка этого перечня), в числе которых изготовители продукции, органы по сертификации, испытательные лаборатории, органы государственного контроля и надзора, потребители продукции и иные заинтересованные лица. В части светотехнических изделий в проекте перечня стандартов приведён на: лампы электрические; люминесцентные лампы без встроенного ПРА, газоразрядные лампы ВД, ПРА и светильники для таких ламп; лампы направленного света, светодиодные лампы и связанное с ними оборудование, и сгруппирован в соответствии с приложениями №№ 9, 13, 14 ТР [5].

Следует подчеркнуть, что, согласно положениям договора ЕАЭС [6],

Классы энергетической эффективности ламп электрических (ТР ЕАЭС 048/2019, разд. VI, табл. 1 приложения № 14)

Класс энергетической эффективности	Индекс энергетической эффективности	
	Для ламп (источников света) ненаправленного света	Для ламп (источников света) направленного света
A++	$EEI \leq 0,11$	$EEI \leq 0,13$
A+	$0,11 < EEI \leq 0,17$	$0,13 < EEI \leq 0,18$
A	$0,17 < EEI \leq 0,24$	$0,18 < EEI \leq 0,4$
B	$0,24 < EEI \leq 0,60$	$0,4 < EEI \leq 0,95$
C	$0,60 < EEI \leq 0,80$	$0,95 < EEI \leq 1,20$
D	$0,80 < EEI \leq 0,95$	$1,20 < EEI \leq 1,75$
E (наименее эффективный)	$EEI > 0,95$	$EEI > 1,75$

для объектов технического регулирования, в отношении которых вступают в силу ТР Союза, эти требования становятся обязательными, а ранее действующие нормы законодательства государств-членов становятся недействительными. Таким образом, после вступления в действие ТР [5] все ранее действующие национальные нормативные акты, касающиеся требований к осветительным устройствам и электрическим лампам, используемым в цепях переменного тока, а также к классам их энергетической эффективности, которые должны содержаться в технической документации, прилагаемой к этим товарам, в маркировке и на их этикетках, утратят свою силу.

В ТР [5] при оценке соответствия всех видов светотехнической продукции установлена единая форма подтверждения соответствия – сертификация. После введения в действие ТР [5] у заявителя на проведение работ по сертификации светотехнической продукции будет иметься возможность получения одного сертификата соответствия требованиям сразу четырех ТР – [1–3, 5]. Причём проведение анализа состояния производства, которое в обязательном порядке предусматривается при сертификации серийно выпускаемой продукции, можно будет осуществлять один раз, что позволит значительно экономить денежные средства заявителя. В случае наличия акта анализа производства, проведённого ранее органом по сертификации в рамках сертификации светотехнических изделий на соответствие требованиям ТР [1]

и (или) ТР [2], и (или) ТР [3] при сертификации изделий на соответствие требованиям ТР [5] дополнительное проведение анализа состояния производства не потребуется, если с даты проведения анализа прошло не более трёх лет. Подчеркнём, что получение сертификата соответствия четырём ТР в одном органе по сертификации будет возможно при условии аккредитации этого органа Федеральной службой по аккредитации и включения в единый реестр органов по сертификации и испытательных лабораторий (центров) ЕАЭС (Таможенного союза). При этом орган по сертификации должен иметь в области аккредитации все четыре ТР и экспертов по светотехнической продукции, имеющих сертификаты компетентности в этой области.

ТР [5] устанавливает обязанность продавцов по информированию покупателей о классе энергетической эффективности энергопотребляющих устройств и о других параметрах энергетической эффективности при продаже, в том числе дистанционным способом. Этикетка энергетической эффективности ламп электрических должна содержать следующие сведения: наименование или товарный знак (при наличии) изготовителя; обозначение модели; класс энергетической эффективности; расчётное потребление электроэнергии в кВт·ч за 1000 ч работы лампы. Этикетка энергетической эффективности светильников должна содержать следующие сведения: наименование или товарный знак (при наличии) изготовителя; обозначение модели; инфор-

мацию о светильнике (тип, исполнение, совместимость); класс энергетической эффективности; сведения в соответствии с одним из вариантов исполнения, указанным в ТР.

В ТР [5] не приводятся формы этикеток для энергопотребляющих устройств, поэтому Совет ЕЭК установил, что данный ТР не вступит в силу без утверждения формы этикеток энергопотребляющих устройств разных видов и правил их оформления, которые ЕЭК должна разработать до 1 марта 2021 г. В этой связи ТР [5] начнёт действовать не ранее 1 сентября 2021 г. после того, как вступят в силу требования, устанавливающие формы этикеток энергопотребляющих устройств разных видов и правила их оформления.

С целью подготовки бизнес-сообщества к переходу на требования ТР [5] предполагается, что до 1 сентября 2023 г. будут допускаться производство и выпуск в обращение на территориях государств-членов ЕАЭС продукции:

- не подлежавшей до дня вступления в силу ТР обязательной оценке соответствия обязательным требованиям к энергетической эффективности, установленным актами, входящими в право Союза, или законодательством государства-члена ЕАЭС, без документов об обязательной оценке соответствия и без маркировки национальным знаком соответствия (знаком обращения на рынке);

- при наличии документов об оценке соответствия продукции обязательным требованиям к энергетической эффективности, ранее

установленным актами, входящими в право Союза, или законодательством государства-члена ЕАЭС, выданных или принятых до дня вступления в силу ТР. Проектом решения Коллегии ЕЭК также предусмотрено, что обращение такой продукции допускается в течение срока её службы, установленного в соответствии с законодательством государства-члена ЕАЭС.

Важно отметить, что требования ТР [5] основываются на европейском подходе и в значительной мере гармонизированы с требованиями директив и регламентов Европейского союза. В настоящее время в ЕС в соответствии с регламентом [7] рассматривается система классов энергетической эффективности, которые отражаются на этикетке энергетической эффективности продукции. Будет установлена новая маркировка продукции с обновлённой системой классов энергетической эффективности по сравнению с директивой [8], которая отменена с 1 августа 2017 г. регламентом [7]. Изменения в части маркировки и системы классов энергоэффективности будут касаться и светотехнической продукции, т.к. делегированный регламент [9], дополняющий директиву [8] в части маркировки энергоэффективности электрических ламп и светильников и подробно изложенный в статье [10], продолжит применяться в ЕС до соответствующих изменений, внесение которых, согласно регламенту [7], планируется завершить до 2030 г.

Заключение

Энергопотребляющие устройства, в число которых входит светотехническая продукция, относятся к изделиям широкого применения, имеющим значительную долю в балансе энергопотребления РФ и тем самым оказывающим существенное влияние на общее потребление топливно-энергетических ресурсов, выброс парниковых газов и энергетическую безопасность государства, состояние окружающей среды. Принятие ТР [5] является необходимым и актуальным решением для обеспечения энергетической и экологической безопасности российской экономики. Введение требований по энергетической эффективности и поэтапное ужесточение

критериев отнесения светотехнической продукции к более энергоэффективной основываются на научно-технических предпосылках, конструктивных резервах и принципиальных возможностях для повышения энергетической эффективности изделий.

Соответствие светотехнической продукции при её оценке требованиям вновь вводимых ТР [3, 5] и требованиям действующих ТР [1, 2] будет служить гарантом выхода на евразийский рынок безопасных, качественных и энергоэффективных изделий.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Технический регламент Таможенного союза «О безопасности низковольтного оборудования» (ТР ТС 004/2011) (с изменениями на 9 декабря 2011 г.). URL: <http://www.docs.cntd.ru/document/902299536> (дата обращения: 10.01.2020).

2. Технический регламент Таможенного союза «Электромагнитная совместимость технических средств» (ТР ТС 020/2011). URL: <http://www.docs.cntd.ru/document/902320551> (дата обращения: 10.01.2020).

3. Технический регламент Евразийского экономического союза «Об ограничении применения опасных веществ в изделиях электротехники и радиоэлектроники» (ТР ЕАЭС 037/2016). URL: <http://docs.cntd.ru/document/420387089> (дата обращения: 10.01.2020).

4. Directive 2011/65/EU RoHS of the European Parliament and of the Council of 8 June 2011 on the restriction of the use of certain hazardous substances in electrical and electronic equipment (Директива ЕС 2011/65/EU RoHS Европейского парламента и Совета ЕС от 8 июня 2011 г. по ограничению содержания вредных веществ в электрическом и электронном оборудовании). URL: http://www.schmidt-export.ru/sites/default/files/pdf/ce_cert/2011-65_rohs-en.pdf (дата обращения: 10.01.2020).

5. Технический регламент Евразийского экономического союза «О требованиях к энергетической эффективности энергопотребляющих устройств» (ТР ЕАЭС 048/2019). URL: <http://docs.cntd.ru/document/564066230> (дата обращения: 10.01.2020).

6. Договор о Евразийском экономическом союзе (Астана, 29 мая 2014 г.) с изменениями и дополнениями. URL: <https://base.garant.ru/70670880/> (дата обращения: 03.03.2020).

7. Regulation (EU) 2017/1369 of the European Parliament and of the Council of 4 July 2017 setting a framework for energy labelling and repealing Directive 2010/30/EU (Регламент (ЕС) 2017/1369 Европейского парламента

и Совета от 4 июля 2017 г., устанавливающий рамки для энергетической маркировки и отменяющий Директиву 2010/30/EU) // Official Journal of the European Union. – 28.07.2017. – L 198. – P. 1–24.

8. Directive 2010/30/EU of the European Parliament and of the Council of 19 May 2010 on the indication by labelling and standard product information of the consumption of energy and other resources by energy-related products (Директива об указании в маркировке и в стандартной информации об изделии информации о потреблении энергопотребляющими изделиями энергии и других ресурсов) // Official Journal of the European Union. – 18.06.2010. – L 153. – P. 1–12.

9. Commission Delegated Regulation (EU) No 874/2012 of 12 July 2012 supplementing Directive 2010/30/EU of the European Parliament and of the Council with regard to energy labelling of electrical lamps and luminaires (Делегированный регламент, дополняющий директиву 2010/30/EU в отношении энергетической маркировки электрических ламп и светильников) // Official Journal of the European Union. – 26.09.2012. – L 258. – P. 1–20.

10. Абрашкина М.Л., Сысоева Е.А. Требования к энергетической эффективности, маркировке и экодизайну светотехнической продукции: европейский опыт // Светотехника. – 2017. – № 3. – С. 42–45.



Рожкова Татьяна Александровна,

инженер. Окончила в 1976 г. Мордовский государственный университет им. Н.П. Огарёва. Ведущий специалист Центра сертификации электрических

ламп и светотехнических изделий. Область научных интересов: организация и проведение работ по оценке (подтверждению) соответствия светотехнических изделий



Сысоева Евгения Александровна,

доктор экон. наук, доцент. Окончила в 1998 г. Мордовский государственный университет им. Н.П. Огарёва. Зав. кафедрой статистики, эконометрики и

информационных технологий в управлении Национального исследовательского Мордовского государственного университета им. Н.П. Огарёва. Область научных интересов: исследование проблем качества и конкурентоспособности светотехнической продукции

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 электрического режима работы светильников со светодиодами на изменение их коррелированной цветовой температуры в процессе эксплуатации

С.С. КАПИТОНОВ^{1,2}, А.С. ВИНОКУРОВ², С.В. ПРЫТКОВ^{1,2},
С.Ю. ГРИГОРОВИЧ¹, А.В. КАПИТОНОВА¹, Д.В. ГУЩИН²,
С.А. МЕДВЕДЕВ¹, Д.В. ВИЛЬГЕЛЬМ¹

¹ ФГБОУ ВО «МГУ им. Н.П. Огарёва», Саранск

² ООО «НИИИС им. А.Н. Лодыгина», Саранск

E-mail: kapitonov_ss@vniis.su

Аннотация

Описаны результаты комплексного исследования по повышению качества светильников со светодиодами в части установления характера изменения их коррелированной цветовой температуры (КЦТ) в процессе эксплуатации. При этом: получены зависимости КЦТ светильников со светодиодами с удалённым и ближним расположением люминофора в течение 10 тыс. ч эксплуатации в разных электрических режимах работы; представлены результаты сравнения начального и конечного спектров излучения светильников; спрогнозировано с помощью методов математической статистики изменение КЦТ светильников в течение заявленного производителем срока службы; определены наиболее неблагоприятные для светильников электрические режимы работы, в которых наблюдается наибольшее изменение КЦТ.

Полученные результаты подтвердили наличие проблемы изменения КЦТ светильников со светодиодами в процессе эксплуатации. Возможный путь её решения – применение более качественных и, соответственно, дорогих светодиодов с ближним расположением люминофора или светодиодов с удалённым люминофором.

Статья может быть интересна как производителям, так и потребителям светодиодных источников света и осветительных приборов с ними.

Ключевые слова: светильник со светодиодами, электрический режим эксплуатации, питающий ток, спектр излучения, поток излучения, коррелированная цветовая температура.

Введение

Проблемы развития освещения светодиодами (СД) в нашей стране во многом связаны с отсутствием соответствующей нормативно-технической базы, что позволяет недобросовестным производителям создавать некачественную светотехническую продукцию и вводить потребителей в заблуждение, заявляя, например, нереально высокий срок службы ОП с СД, в 70–100 тыс. ч [1, 2].

В 2018 г. вступил в действие стандарт Ассоциации производителей светодиодов и систем на их основе [3]. В нём удалось объединить общие требования к ОП, требования к их фотометрическим, колориметрическим и электрическим параметрам, к электромагнитной совместимости, безопасности, надёжности и гарантийным обязательствам. По стандарту, одним из нормируемых колориметрических параметров ОП является коррелированная цветовая температура (КЦТ), которая рассчитывается по спектру излучения ОП [4].

Значение КЦТ должно соответствовать диапазону допустимых отклонений от соответствующего номинального значения КЦТ [5], которое должно декларироваться производителем в ТУ и эксплуатационной документации с указанием размеров зон допустимых отклонений в шагах МакАдама [3].

На данный момент у производителей светильников с СД отсутствует информация о характере изменения КЦТ этих изделий в процессе эксплуатации из-за деградации СД с учётом электрических и тепловых режимов их работы [6, 7]. Таким образом, пока нельзя точно оценивать срок службы светильников с СД, т.к. производителям

не известно, через сколько времени КЦТ светильника выйдет за установленные пределы даже в номинальном режиме работы [8]. При этом часто СД в светильнике работают в электрических и тепловых режимах, отличных от номинального, и потому исследования спектра излучения и его временных изменений при разных режимах эксплуатации – задача актуальная.

В связи с этим целью работы являлось повышение качества светильников с СД путём определения характера изменения их КЦТ в процессе эксплуатации с учётом электрического режима работы. Для достижения цели ставились следующие задачи: 1) получение временных зависимостей КЦТ светильников в процессе 10 тыс. ч эксплуатации при разных электрических режимах работы; 2) сравнение спектров излучения светильников в начале и после 10 тыс. ч эксплуатации; 3) прогнозирование с помощью методов математической статистики изменения КЦТ светильников в течение заявленного производителями срока службы; 4) определение наиболее неблагоприятных для светильников электрических режимов работы, в которых наблюдается наибольшее изменение КЦТ в процессе эксплуатации.

Предполагалось, что результаты исследования помогут производителям СД и светильников с ними разобраться в причинах изменений спектра излучения и КЦТ этих изделий в процессе эксплуатации и предпринять соответствующие меры по повышению их срока службы [9].

Методы

Проведено исследование по временной зависимости спектра излучения и КЦТ партии светильников с СД двух российских производителей в разных электрических режимах их эксплуатации. По этическим соображениям названия производителей в статье не раскрыты. Светильники производителя 1 построены на СД с удалённым люминофором, что, по данным производителя, сохраняет их характеристики и значения параметров, близкими к номинальным на протяжении всего срока службы. В светильниках производителя 2 использованы СД с ближним расположением люминофора (наиболее распространённый вид СД). В табл. 1

представлены основные паспортные данные указанных светильников.

Для измерений спектров излучения и КЦТ применялась фотоколориметрическая установка (свидетельство об утверждении типа средств измерений RU.E.37.003.A NG 64752), предназначенная для измерений светового потока, КЦТ, координат цветности в системах XYZ (1931), uv (1960) и u'v' (1976). Принцип действия установки основан на определении значений радиометрических, фотометрических и колориметрических величин через измерение абсолютной спектральной плотности потока излучения в диапазоне длин волн 360–1100 нм. При этом определение КЦТ осуществлялось автоматически с помощью программного обеспечения, поставляемого с установкой. Последняя состоит из интегрирующей сферы OL IS-7600, многоканального спектро радиометра OL 770 VIS/NIR, вспомогательной лампы AUX LAMP A180 с источником питания OL 410–200. Интегрирующая сфера (алюминиевая) имеет диаметр 1950 мм и состоит из двух отдельных полушарий, двух портов выхода, порта лампы (дополнительного) и внутреннего крепежа патрона для лампы. Оба полушария легко разъединимы (для облегчения установки и замены лампы или частей крепежа). Диаметр сферы позволяет измерять светильники до 1800 мм в длину с максимальным световым потоком 200 клм. Один из портов выхода с помощью оптоволоконного кабеля соединён с входной щелью спектро радиометра. Свет, падающий на внутреннюю стенку сферы по оптоволоконному кабелю, попадает на эту щель. Далее он падает на вогнутую дифракционную решётку, выполняющую разложение света на монохроматические составляющие и фокусировку его на ПЗС-матрицу. (После отражения света от решётки каждая монохроматическая составляющая его падает на отведённый для неё участок ПЗС-матрицы). Перед выходным отверстием сферы и перед вспомогательной лампой внутри сферы установлены защитные экраны, исключающие выход любого прямого излучения.

Для исследования были выбраны следующие режимы работы светильников.

Режим 1. Номинальный режим работы, в котором ток СД в светильнике равен номинальному – 350 мА (производитель 1) или 260 мА (производи-

Рис. 1. Временные зависимости КЦТ светильников производителя 1 в разных режимах их работы: режим 1 (чёрный цвет); режим 2 (красный); режим 3 (синий); режим 4 (зелёный)

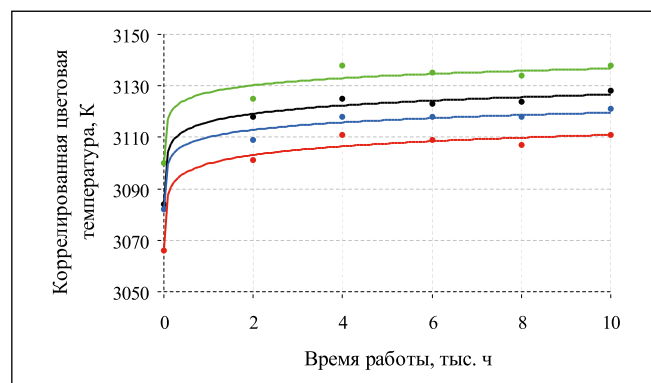
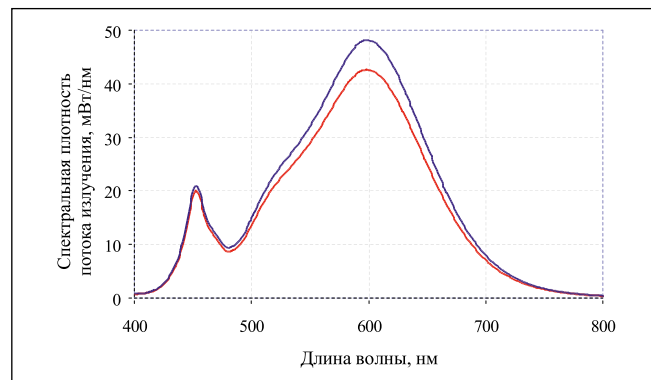


Рис. 2. Спектры излучения светильника производителя 1 в режиме 2: начальный (синий цвет) и после 10 тыс. ч работы (красный цвет)



тель 2), заявленному производителем, а коэффициент пульсации тока не превышает 1 %.

Режим 2. Режим токовой перегрузки, в котором ток СД в светильнике больше номинального. В светильниках производителя 1 этот ток был на 10 % выше номинального, составляя 390 мА (табл. 1). Поскольку номинальный ток СД в светильнике производителя 2 (260 мА) ниже паспортного (номинального) для этих СД (350 мА), то было решено в качестве токовой перегрузки СД в светильнике выбрать указанный паспортный ток (табл. 1). При этом коэффициент пульсации тока светильников обоих производителей не превышает 1 %.

Режим 3. Режим, в котором ток СД в светильнике равен номинальному току СД, а коэффициент пульсации тока равен 10 %. Частота пульсаций тока в режимах 3 и 4 равна 50 кГц.

Режим 4. Режим, в котором ток СД в светильнике равен номинальному току СД, а коэффициент пульсации тока составляет 40 %.

Нужные токи питания СД матрицы светильников задавались с помощью регулируемых УУ («драйверов»), выпускаемых компанией «Аргос-Трейд» (Санкт-Петербург), которые позволяют регулировать выходной ток от 240 до 390 мА [10], а нужные коэффициенты пульсаций тока – путём изменения

и подбора выходной индуктивности УУ по временной зависимости тока на экране цифрового осциллографа.

Результаты

Для проведения эксперимента были выбраны две партии из четырёх светильников каждого производителя. В первую очередь измерялись КЦТ светильников в номинальном режиме работы (табл. 2).

Диапазоны максимального отклонения значений КЦТ для её соответствующего номинального значения по стандарту [3] приведены в табл. 3. Из табл. 2 и 3 следует, что разброс значений КЦТ новых светильников производителя 1 полностью соответствует требованиям стандарта [3]. Отклонение значений КЦТ новых светильников производителя 2 существенно больше и выходит за пределы допустимых отклонений по табл. 3 для 4-шаговых зон (верхний предел 4139 К).

Исследовались изменения спектра излучения и КЦТ указанных светильников в течение 10 тыс. ч их работы с шагом измерений 2 тыс.ч. Время, затраченное на измерение, не учитывалось при расчёте общего времени работы светильников. Для каждого светильника по табл. 2 устанавливался соответствующий ему режим работы.

Таблица 1

Паспортные данные испытуемых светильников

№ п/п	Наименование параметра	Производитель 1	Производитель 2
1	Номинальная мощность, Вт	24	19
2	Номинальный световой поток, лм	3750	2580
3	Номинальный ток светодиодов, указанный в их паспорте, mA	350	350
4	Номинальный ток светодиодов в светильнике, mA	350	260
5	КЦТ, К	3000	4000
6	Срок службы, тыс. ч	> 70	90

Рис. 3. Временные зависимости КЦТ светильников производителя 2 в разных режимах их работы: режим 1 (чёрный цвет); режим 2 (красный); режим 3 (синий); режим 4 (зелёный)

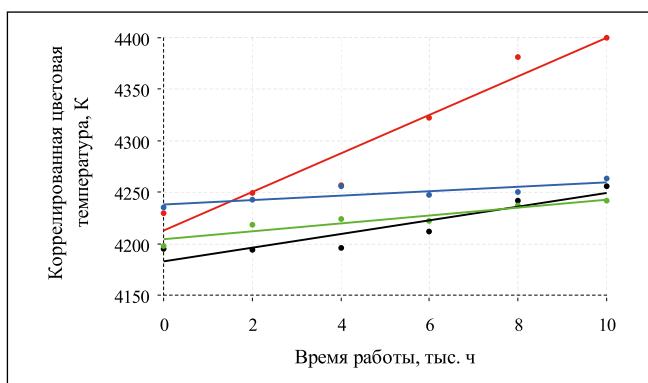
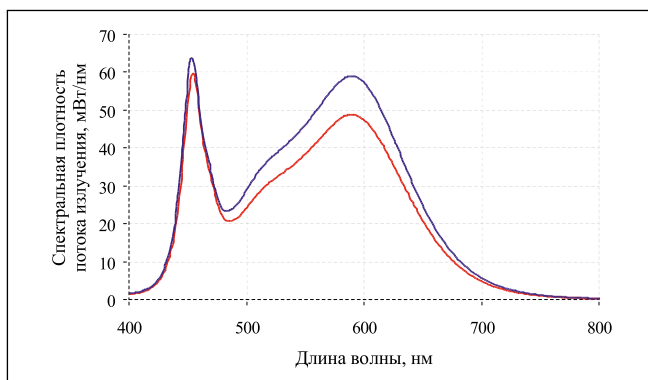


Рис. 4. Спектры излучения светильника производителя 2: начальный (синий цвет) и после 10 тыс. ч работы (красный цвет) в режиме 2



На рис. 1 представлены временные зависимости КЦТ светильников производителя 1 при разных режимах их работы. Оптимальные аппроксимации (логарифмические) этих зависимостей – КЦТ (К) от времени работы t (тыс. ч), полученные в среде «MS Excel», таковы: КЦТ = $4,5998 \cdot \ln(t) + 3115,9$ (режим 1); КЦТ = $4,8382 \cdot \ln(t) + 3099,7$ (режим 2); КЦТ = $4,1064 \cdot \ln(t) + 3110$ (режим 3); КЦТ = $4,0043 \cdot \ln(t) + 3127,4$ (режим 4).

Из рис. 1 видно, что скорость нарастания КЦТ светильников производителя 1 в разных режимах их работы примерно одинакова. После 10 тыс. ч работы значения КЦТ не вышли за пределы диапазонов допустимых отклонений для 4- и 7-шаговых зон (табл. 3), верхние

границы которых равны 3145 и 3220 К соответственно.

Наибольшее изменение КЦТ наблюдалось у светильника производителя 1, работающего в режиме 2 (при токовой перегрузке), а изменение спектра излучения этого светильника после 10 тыс. ч работы показано на рис. 2. Из рисунка видно, что за этот срок произошло снижение на 6 мВт/нм пика спектральной плотности потока излучения на длине волны около 600 нм, соответствующей оранжево-красному свету, а пик на длине волны около 450 нм (сине-голубой свет) практически не менялся. Эта закономерность и объясняет временной рост КЦТ – повышением доли синей составляющей в спектре излучения светильника.

Результаты испытания светильников производителя 2 при разных режимах их работы показаны на рис. 3. Оптимальные аппроксимации (линейные) этих зависимостей, также полученные в среде «MS Excel», таковы: КЦТ = $6,0359 \cdot t + 4184$ (режим 1); КЦТ = $16,978 \cdot t + 4216,9$ (режим 2); КЦТ = $1,807 \cdot t + 4239,5$ (режим 3); КЦТ = $3,4238 \cdot t + 4205,4$ (режим 4).

Характер изменения КЦТ в течение 10 тыс. ч эксплуатации светильников производителя 2 одинаков для всех режимов работы. Наибольшая скорость нарастания КЦТ наблюдалась в режиме 2.

КЦТ в этом режиме поднялась на 170 К и достигла 4400 К, что существенно выше верхних границ допустимых отклонений для 4- и 7-шаговых зон МакАдама (табл. 3).

Изменение спектра излучения данного светильника, проработавшего в режиме 2, после 10 тыс. ч работы показано на рис. 4. В области максимума на длине волны 590 нм снижение спектральной плотности потока излучения составило 10 мВт/нм, а в области пика на длине волны 450 нм эта величина снизилась на 4 мВт/нм. Как и в случае светильника производителя 1, этим и объясняется повышение КЦТ в данном случае.

Было интересно оценить пределы изменения КЦТ указанных светильников в течение заявленных их производителями сроков службы (табл. 1). С учётом огромности этих сроков были применены методы математического прогнозирования по результатам испытаний светильников в течение 10 тыс.ч. Возможность прогнозирования по достаточно короткому отрезку времени обусловлена тем, что после 10 тыс. ч непрерывной работы параметры и характеристики СД начинают существенно меняться из-за деградиционных процессов в люминофоре и кристалле, что обычно отражено в паспорте любых СД или ОП с СД. Поэтому, делая прогноз на основании результатов за первые 10 тыс. ч работы светильников, мы рассматриваем самый благоприятный вариант развития событий, и если при этом светильники не укладываются в установленные требования [3], то, очевидно, заявленные сроки службы светильников (табл. 1) не будут реальны.

Применялся один из самых популярных видов графического прогнозирования (реализованный в «MS

Excel») – экстраполяция, выполняемая построением линии тренда. Суть этого вида прогнозирования заключается в построении графика рассматриваемой зависимости на основе табличных данных, состоящих из аргументов и значений функции, наложении линии тренда и выборе одного из шести видов аппроксимации.

Результаты прогнозирования временной зависимости КЦТ светильников производителя 1 после 70 тыс. ч работы представлены на рис. 5, из которого видно, что «конечные» КЦТ светильников не вышли за пределы диапазонов допустимых отклонений, указанных в табл. 3 для 4- и 7-шаговых зон МакАдама (верхние пределы равны 3145 и 3220 К соответственно). Максимальная КЦТ, в 3143 К, зафиксирована у светильника, работающего в режиме 4. Наибольшее изменение КЦТ, в 50 К, наблюдается у светильника, работающего в режиме 2.

Результаты прогнозирования временной зависимости КЦТ светильников производителя 2 после 90 тыс. ч работы представлены на рис. 6, из которого видно, что КЦТ в каждом испытательном режиме значительно превысила верхние пределы диапазонов допустимых отклонений, указанных в табл. 3 для 4- и 7-шаговых зон МакАдама (верхние пределы равны 4139 и 4260 К соответственно). Максимальное изменение КЦТ, в 1650 К, при котором она достигла 5880 К, зафиксировано в испытательном режиме 2.

Заключение

По результатам проведённых исследований можно заключить следующее.

1. КЦТ светильников производителя 1, выполненных на СД с удалённым люминофором, ни в одном испытательном режиме не вышли за пределы диапазонов допустимых отклонений по стандарту [3]. КЦТ светильников производителя 2, выполненных на СД с ближним расположением люминофора, при каждом испытательном режиме значительно превышают верхние пределы диапазонов допустимых отклонений [3]. Объясняется это тем, что в СД с ближним расположением люминофора и последний, и кристалл испытывают большее тепловое воздействие, чем удалённый люминофор с соответствующим кристаллом, и поэтому, быстрее деградируя, быстрее изменяют КЦТ. Технология удалённого

Таблица 2
Результаты измерений КЦТ светильников в номинальном режиме работы

	Светильник № 1	Светильник № 2	Светильник № 3	Светильник № 4
КЦТ, К (производитель 1)	3084	3066	3082	3100
КЦТ, К (производитель 2)	4195	4230	4235	4198

Таблица 3
Диапазоны максимального отклонения значений КЦТ для соответствующего номинального значения

Номинальное значение КЦТ, К	Центральное значение КЦТ и диапазон допустимых отклонений для 7 шагов МакАдама, К	Центральное значение КЦТ и диапазон допустимых отклонений для 4 шагов МакАдама, К
3000	3045 ± 175	3045 ± 100
4000	3985 ± 275	3985 ± 154

Рис. 5. Временная зависимость КЦТ светильников производителя 1 в течение 70 тыс. ч их работы: режим 1 (чёрный цвет); режим 2 (красный); режим 3 (синий); режим 4 (зелёный)

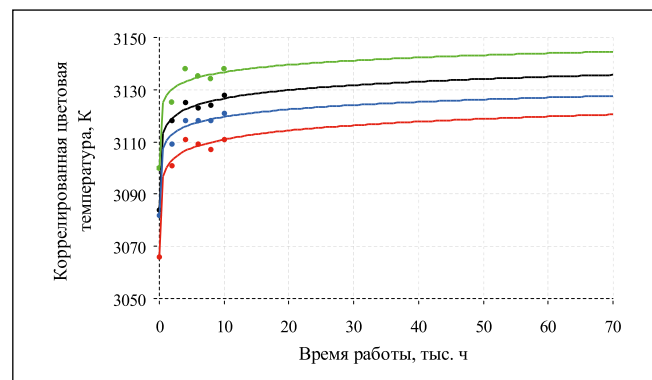
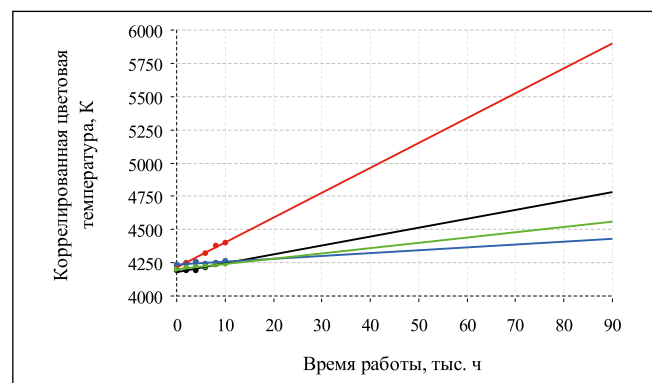


Рис. 6. Временная зависимость КЦТ светильников производителя 2 в течение 90 тыс. ч их работы: режим 1 (чёрный цвет); режим 2 (красный); режим 3 (синий); режим 4 (зелёный)



люминофора позволила отчасти решить данную проблему.

2. Преимущественное снижение уровня спектральной плотности излучения светильников с СД в процессе их эксплуатации в диапазоне длин волн 500–700 нм, являясь следствием деградации люминофора и кристалла СД, изменяет (повышает) КЦТ этих изделий.

3. Наибольшие изменения КЦТ светильников обоих производителей наблюдались в режиме 2 (при токовой перегрузке), в котором СД испытывали тепловые перегрузки, ускорившие

деградационные процессы в кристалле и люминофоре. Однако для светильников производителя 1 данный режим не привёл к фатальным изменениям КЦТ, тогда как у светильников производителя 2 КЦТ вышла за пределы диапазонов допустимых отклонений уже через 10 тыс. ч их эксплуатации. Таким образом, режим, в котором питающий СД ток выше номинального и который часто используют производители для повышения светового потока светильников, является крайне нежелательным.

4. По скорости изменения КЦТ светильников обоих производителей режимы 3 и 4 (с коэффициентами пульсации питающего тока, существенно большими допустимых) лишь незначительно отличаются от режима 1 (номинального).

5. Возможный путь повышения стабильности КЦТ светильников в процессе эксплуатации – применение более качественных (и, соответственно, дорогих) СД с ближним расположением люминофора или же СД с удалённым люминофором.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Червинский М. Отказы светодиодных светильников: причины и способы предупреждения // Современная светотехника. – 2015. – № 4. – С. 42–52.

2. Никифоров С.Г. Актуальность изучения и необходимость совершенствования мето-

дик исследования деградации параметров светодиодов на основе твёрдых растворов AlGaInP и AlGaInN // Полупроводниковая светотехника. – 2012. – № 15. – С. 36–37.

3. СТО 69159079–01–2018 «Приборы осветительные светодиодные. Требования к техническим и эксплуатационным параметрам».

4. Никифоров С.Г. Разработка средств измерений и методов контроля параметров полупроводниковых излучателей на основе соединений АПБВ, используемых в высоконадёжных приборах / Автореф. дис. ... д-ра техн. наук. – М.: 2015. – 39 с.

5. ANSI C78.377–2017 «American National Standard for Electric Lamps – Specifications for the Chromaticity of Solid State Lighting (SSL) Products».

6. Liu Z., Yang B., Zhang C.E., Li Y., Zou J., Shi M., Qian X., Zheng F. Model prediction on the correlated color temperature of white LED based on chromaticity coordinate // Journal of Luminescence. – 2019. – Vol. 216. – № 116652.

7. Lin D., Zheng P., He G. Color temperature tunable white LED cluster with color rendering

index above 98 // EEE Photonics Technology Letters. – 2017. – Vol. 29 (12). – P. 1050–1053.

8. Капитонов С.С., Прытков С.В., Григорович С.Ю., Капитонова А.В., Медведев С.А., Слугина Н.П. Исследование изменения цветовой температуры и спектра излучения светодиодных светильников в процессе их эксплуатации // Научно-технический вестник Поволжья. – 2019. – № 1. – С. 84–87.

9. Huang Y.-S., Luo W.-C., Wang H.-C., Feng S.-W., Kuo C.-T., Lu C.-M. How smart LEDs lighting benefit color temperature & luminosity transformation // Energies. – 2017. – 10(4). – № 518.

10. Беспалов Н.Н., Ильин М.В., Капитонов С.С. Оборудование для испытаний управляющих устройств для светильников со светодиодами и ЭПРА для люминесцентных ламп // Светотехника. – 2017. – № 4. – С. 42–46; Беспалов Н.Н., Ильин М.В., Капитонов С.С. Testing equipment for LED luminaire control devices and fluorescent lamp electron ballasts // Light & Engineering. – 2017. – Vol. 25 (4). – P. 86–91.



Капитонов Сергей Сергеевич, кандидат техн. наук. Окончил в 2010 г. Мордовский государственный университет им. Н.П. Огарёва. Доцент кафедры электроники и нанoeлектроники ФГБОУ ВО «МГУ им. Н.П. Огарёва» и директор по научно-техническому развитию ООО «НИИИС им. А.Н. Лодыгина». Область научных интересов: агрофотоника, исследование и разработка светодиодных источников света и устройств управления для них, разработка и исследование разрядных ламп НД



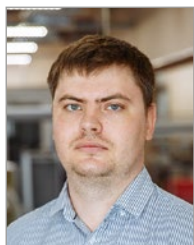
Капитонова Анастасия Владимировна, инженер. Окончила в 2013 г. Мордовский государственный университет им. Н.П. Огарёва. Аспирант кафедры источников света ФГБОУ ВО «МГУ им. Н.П. Огарёва». Область научных интересов: исследование и разработка светодиодных источников света и устройств управления для них



Винокуров Алексей Сергеевич, инженер. Окончил в 2008 г. Мордовский государственный университет им. Н.П. Огарёва. Генеральный директор ООО «НИИИС им. А.Н. Лодыгина». Область научных интересов: исследование и разработка светодиодных источников света и устройств управления для них, разработка и исследование разрядных ламп НД



Гузин Дмитрий Владимирович, инженер. Окончил в 2020 г. ФГБОУ ВО «МГУ им. Н.П. Огарёва». Инженер-радиоэлектронщик ООО «НИИИС им. А.Н. Лодыгина». Область научных интересов: исследование и разработка светодиодных источников света и устройств управления для них



Прытков Сергей Владимирович, кандидат техн. наук. Окончил в 2010 г. Мордовский государственный университет им. Н.П. Огарёва. Доцент кафедры светотехники ФГБОУ ВО «МГУ им. Н.П. Огарёва». Область научных интересов: фотометрия, исследование и разработка светодиодных источников света и устройств управления для них, разработка и исследование разрядных ламп НД



Медведев Сергей Антонович, бакалавр. Окончил в 2019 г. бакалавриат кафедры электроники и нанoeлектроники ФГБОУ ВО «МГУ им. Н.П. Огарёва». Область научных интересов: исследование и разработка светодиодных источников света и устройств управления для них



Григорович Сергей Юрьевич, инженер. Окончил в 2010 г. Мордовский государственный университет им. Н.П. Огарёва. Аспирант кафедры электроники и электротехники ФГБОУ ВО «МГУ им. Н.П. Огарёва». Область научных интересов: исследование и разработка светодиодных источников света и устройств управления для них



Вильгельм Дмитрий Викторович, бакалавр. Окончил в 2019 г. бакалавриат кафедры электроники и нанoeлектроники ФГБОУ ВО «МГУ им. Н.П. Огарёва». Область научных интересов: исследование и разработка светодиодных источников света и устройств управления для них

Снижение энергопотребления в беспроводных сенсорных сетях дорожного освещения¹

М. ЧИБУК

Факультет вычислительной техники, Университет Битлис Эрен, Турция
E-mail: mcibuk@beu.edu.tr

Аннотация

Целью данного исследования является снижение энергопотребления беспроводной сенсорной сети с линейной топологией за счёт предложенных новых методов. Поскольку физическая установка систем дорожного освещения требует финансовых и трудовых затрат, эти методы были отработаны и проанализированы в режиме моделирования. Два метода предлагаются для ускоренного развёртывания системы освещения и повышения быстродействия датчиков, которые подключаются к сети и передают данные со светильников: метод сетевого соединения через прокси и новый метод обработки пакетов данных в общем канале с разграничением доступа по времени. Сравнительный анализ сценариев энергопотребления системами освещения с 50, 100, 150 и 200 светильников проводился во время обмена данными через беспроводные сенсорные сети. Классический метод и предложенный новый метод оценивались в рамках сценариев передачи данных с помощью одно- или многоскачковой радиосвязи. При обмене данными между светильниками по предложенному новому методу с использованием односкачковой радиосвязи общее энергопотребление было по меньшей мере на 80 % эффективнее по сравнению с классическим методом. В рамках того же сценария общее энергопотребление систем освещения с линейной топологией оказалось эффективнее на 58 % при сравнении нового метода с классическим и использовании структуры с тремя скачками.

Ключевые слова: умное освещение, беспроводная сенсорная сеть, энергоэффективность, линейное освещение.

1. Введение

В линейной беспроводной сенсорной сети (*WSN, wireless sensor network*) узлы располагаются один за другим. Данные передаются узлу-координатору от исходного узла через другие узлы. Чем больше узлов, тем существеннее сквозная задержка пакетов данных и насыщеннее трафик в тех узлах, которые расположены поблизости от узла-координатора. Кроме того, чем больше количество узлов в линейной топологии, тем выше вероятность столкновения и заклинивания пакетов. Протоколы, разработанные для идеальных линейных топологий, должны обладать высокой чувствительностью ко времени задержки, обеспечивать стабильное подключение и безошибочную передачу данных в ЦОД.

Что касается энергопотребления, доля освещения в общем потреблении энергии увеличивается с каждым днём. Умные системы обеспечивают устойчивое и бесперебойное освещение [1–5]. Беспроводные сети часто используются для интеллектуального освещения при автоматизации систем удалённого мониторинга и дистанционного управления [6–9].

Узлы являются неотъемлемой частью беспроводных сенсорных сетей, и увеличение их количества замедляет работу таких сетей. Шаблоны соединений и последовательность подключения узлов (топология) оказывают непосредственное влияние на производительность и срок службы сети [10, 11]. Для обеспечения самоорганизации сети, уменьшения вероятности возникновения столкновений пакетов на линиях связи, а также заклиниваний и помех, энергосбережения и продления срока службы сети важно правильно подобрать топологию сети [12, 13]. Но в случае с линейным дорожным освещением речь о выборе топологии не идёт. Для линейного дорожного освещения использование беспроводной сенсорной сети с линей-

ной топологией – обязательное условие [14–16]. Поэтому для нормального функционирования системы дорожного освещения с линейной топологией необходимо устранить причины возникновения заклиниваний и конфликтов между пакетами во время передачи данных внутри беспроводной сенсорной сети, а также уменьшить количество помех. При выполнении этих операций особое внимание уделяется энергосбережению [8, 17].

В данном исследовании предлагается новый эффективный метод для уменьшения энергопотребления беспроводными сенсорными сетями с линейной топологией в системах дорожного освещения. Узел освещения (*LN, lighting node*) в этой работе обозначает светильник. Трансформаторный столб называется узлом-координатором (*CLN, coordinator lighting node*).

Система дистанционного мониторинга и управления, которая является предметом данного исследования, записывает различные параметры: уровень яркости дорожного покрытия от узла освещения (светильника), снижение светового потока светильника на основе анализа яркости дорожного покрытия по сравнению со значением яркости в первый день, туманность, влажность, температура воздуха независимо от того, включён светильник или нет, а также угол наклона светильника по отношению к локации и пр. Таким образом, сбор информации с узлов освещения и сведений об обслуживании системы дорожного освещения происходит автоматически [8, 16, 18–20].

2. Применение беспроводных сенсорных сетей в системах освещения

Принцип работы линейных беспроводных сенсорных сетей, применяющихся в системах освещения, заключается в обмене данными между узлами освещения и узлом-координатором. Узел-координатор организует работу сети и управляет узлами освещения, обеспечивая передачу данных. При небольшом количестве светильников и отсутствии линейной топологии передача данных между светильниками осуществляется с помощью односкачковой радиосвязи. При линейной топологии светильников используется многоскачковая радиосвязь. Узлы освещения, не подклю-

¹ Перевод с англ. Т.В. Мешковой

Рис. 1. Линейные беспроводные сенсорные сети

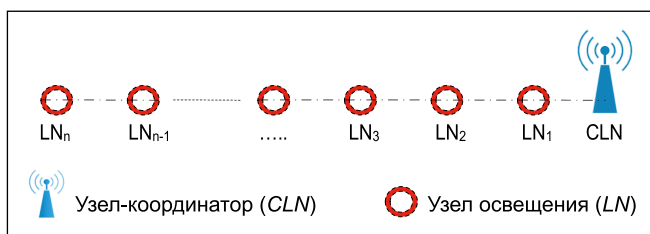
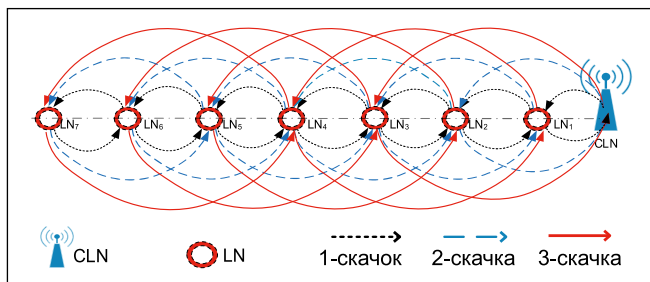


Рис. 2. Линейная структура беспроводной сенсорной сети с передачей данных за один, два или три скачка



чёрные непосредственно к узлу-координатору, связываются с ним через другие узлы из-за большого расстояния [8, 16, 18–20]. На рис. 1 показан образец линейной беспроводной сенсорной сети.

Системы освещения с линейной топологией устанавливаются вдоль дорог, как показано на рис. 1. Такая топология чаще всего используется для освещения дорог и тоннелей. [4, 6, 21, 22].

При линейной топологии узлы освещения направляют узлу-координатору информацию о предыдущем узле. Передача данных осуществляется при помощи одно- или многоскачковой радиосвязи. Количество энергии, потребляемой узлом освещения для передачи пакета данных, растёт по мере увеличения расстояния между светильниками. Помимо этого, на сквозную задержку пакетов при коммутации влияет количество скачков. Чем больше светильников, тем существеннее сквозная задержка пакетов данных. Трафик обмена данными в узлах освещения, расположенных поблизости от узла-координатора, увеличивается прямо пропорционально размеру сети. Как установлено в ходе данного исследования, увеличение количества светильников в системе освещения с линейной топологией ведёт к большей частоте столкновений и заклиниванию пакетов. По этой причине, поскольку решения для дорожного освещения разрабатываются для систем с линейной топологией, следует повысить чувствительность протоколов ко времени задержки, обеспечить стабильное подключение и безошибочную передачу данных в ЦОД [8,

23–25]. В беспроводных сенсорных сетях с линейной топологией передача пакетов данных между светильниками (узлами освещения) и узлом-координатором происходит по схеме, представленной на рис. 2, за один, два или три скачка.

При выборе оптимальных условий для обмена данными в рамках беспроводной сенсорной сети можно ориентироваться на следующие параметры:

- низкое энергопотребление;
- неконфликтующие пакеты данных;
- соединение всех узлов в сеть;
- одновременное подключение к сети;
- отказоустойчивость;
- быстрое восстановление обмена данными после перезапуска при отключении всей системы по какой-либо причине [8, 25, 26].

Модель соединения по односкачковой радиосвязи предусматривает прямой обмен данными между узлами освещения и узлом-координатором. Модель соединения по многоскачковой радиосвязи предусматривает, что узел-координатор обменивается данными с узлами освещения вне зоны покрытия через узлы освещения в зоне покрытия. Соответственно, при работе беспроводной сенсорной сети по многоскачковой радиосвязи узлы освещения имеют совсем другое энергопотребление. Вот почему объём обмена данными индивидуален для каждого узла освещения. Так как узлы освещения, расположенные ближе к узлу-координатору, выполняют функции маршрутизаторов для удалённых узлов освещения, обмен данными в них проходит гораздо ин-

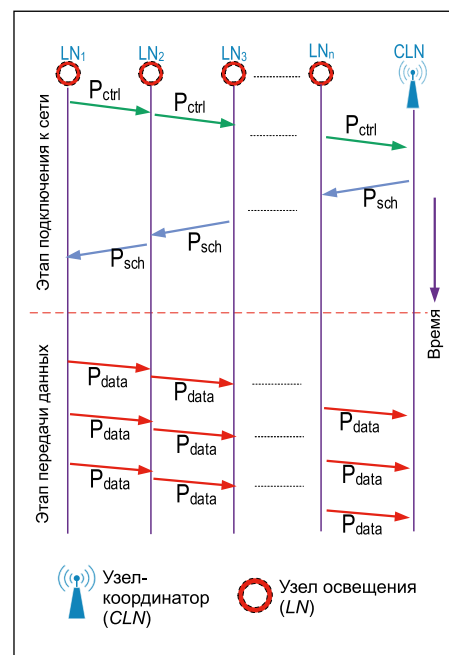


Рис. 3. Классический подход к созданию соединения внутри беспроводной сенсорной сети

тенсивнее, чем в остальных. Поэтому узлы освещения, расположенные ближе к узлу-координатору, потребляют больше энергии. При быстром истощении энергии в узлах освещения ближе к узлу-координатору связь в беспроводной сенсорной сети прерывается. Дальние узлы освещения, подключённые к таким узлам, отключаются от сети, даже если у них ещё есть запас энергии. Передача данных прерывается. В таких случаях лучше применять топологии, использующие энергию эффективно, для оптимальной реализации беспроводных сенсорных сетей. Но для систем дорожного освещения обязательным является использование линейной топологии. Поэтому решения для беспроводных сенсорных сетей в линейных системах дорожного освещения необходимо разрабатывать с учётом особенностей их работы [8].

2.1. Сетевое соединение через прокси

В беспроводных сенсорных сетях с многоскачковой радиосвязью узлы-датчики передают пакеты данных на узел-координатор через другие узлы. Узлы между входом и выходом выполняют свои задачи обнаружения и передают данные от других узлов следующему узлу. На рис. 3 отражён классический подход к созданию сетевого соединения.

В беспроводных сенсорных сетях применяется централизованный подход к распределению каналов и временных интервалов при классических сетевых сценариях. Как показано на рис. 3, вечером становится темнее, светильник отправляет запрос на подключение к сети (P_{ctrl}) при первоначальном включении питания. Получив этот запрос, соседний светильник передаёт его следующему в своём собственном временном интервале. Запрос на подключение к сети передаётся дальше до тех пор, пока не достигнет узла-координатора. Узел-координатор, принимающий запрос на соединение, выделяет под него каналы и временной интервал. Затем он создаёт пакет глобального расписания и пересылает его по маршруту, по которому поступил запрос. Пакет расписания, созданный узлом-координатором, передаётся конечному светильнику, который отправляет запросы через соседние светильники. Если конечный светильник находит свои данные в пакете расписания, он подключается к сети по собственному каналу и с собственным временным интервалом. После этого этап подключения к сети завершён. Соответствующий светильник начинает передавать данные. При использовании таких классических подходов велики временные и энергозатраты. По этой причине организация сети и повторное подключение отключённых от неё узлов энергозатратны и занимают больше времени [8, 27].

В данном исследовании рассматривается создание соединения внутри сети с помощью прокси с целью улучшить энергопотребление и повысить производительность по сравнению с классическим подходом. На рис. 4 отображено создание соединения с сетью с использованием прокси.

Рекомендованный способ подключения к сети через прокси вместо центральной системы с выделением каналов и временных интервалов подразумевает локальный подход. При линейной топологии узлы последовательно передают данные по общему каналу связи [28]. Сетевые узлы используют такой канал как систему с временным разделением. Когда узел пытается подключиться к сети, он отправляет запрос на соединение (P_{ctrl}) соседнему узлу, как показано на рис. 4. Когда соседний узел, подключённый к сети, получает запрос на подключение, то он делится информа-

цией о своём канале и временном интервале с этим узлом, разрешая ему присоединиться к сети при необходимости. На узел-координатор передаётся информация только об узле, который пытается присоединиться к сети. Таким образом, узлу, который пытается подключиться к сети, не требуется принимать пакет расписания (P_{sch}). При использовании этого метода значительно увеличивается скорость подключения узла к сети. Это уменьшает задержку при подключении к сети при сквозной передаче пакетов. Кроме того, пакет запроса (P_{ctrl}) не ретранслируется на другие узлы, снижая энергопотребление.

В данном исследовании суммарное энергопотребление узлов освещения в количестве n и одного узла-координатора в спящем режиме, в режиме прослушивания с низким энергопотреблением и при обмене пакетами были рассчитаны следующим образом [8]. Потребляемая мощность других компонентов сети не учитывается. Количество энергии, необходимое узлу для приёма пакета данных, рассчитывается как представлено ниже:

$$P_R = \frac{L_{pkt}}{R_{ch}} \cdot P_{Rx}, \quad (1)$$

где P_R – мощность, потребляемая при приёме каждого пакета данных, P_{Rx} – мощность, потребляемая приёмником, L_{pkt} – длина пакета в битах, а R_{ch} – значение ёмкости передачи данных (бит/с) канала передачи.

Расчёт энергии, которую любой из узлов освещения, пытающийся отправить данные, использует при передаче пакета, показан ниже:

$$P_T = \frac{L_{pkt}}{R_{ch}} \cdot P_{Tx}, \quad (2)$$

где P_T – это мощность, потребляемая при отправке каждого пакета данных, P_{Tx} – это мощность, затрачиваемая на передачу пакета данных, L_{pkt} – это длина пакета в битах, а R_{ch} – это значение ёмкости передачи данных (бит/с) канала передачи.

Общее количество энергии E_T , затраченное сетью с ($N_C = n + 1$) узлами, состоящими из количества узлов $LN\ n$ ($n > 2$) и, по крайней мере, одного узла-координатора CLN , рассчитывается, как показано ниже:

$$E_T = \sum_{n=1}^{N_C} \left\{ (P_R \cdot N_{Rpkt}) + (P_T \cdot N_{Tpkt}) + \left[P_{SM} + P_{LPL} \right] \right\}, \quad (3)$$

где N_{Rpkt} – количество пакетов, полученных узлами, N_{Tpkt} – количество пакетов, передаваемых узлом, P_{SM} – энергия, которую узел расходует в режиме ожидания, а P_{LPL} – количество энергии, которую узел расходует в режиме прослушивания с низким энергопотреблением.

Как видно на рис. 3, процесс подключения узла к сети при использовании классического подхода не заканчивается до тех пор, пока пакет синхронизации (P_{sch}), отправленный узлу-координатору CLN , не достигнет узла, отправившего запрос на подключение к сети. Если в сети есть по крайней мере два узла освещения LN или более, то данные передают другие узлы между запрашивающим узлом освещения LN и узлом-координатором CLN . Узлы освещения LN в состоянии передачи расходуют столько же энергии, сколько составляет ($P_R + P_T$), чтобы принять пакет, а затем передать его следующему узлу. Таким образом, при классическом подходе общее количество энергии, затраченной при подключении узла к сети, равно результату:

$$P_{classic} = N_C \cdot (P_R + P_T) = (n+1) \cdot (P_R + P_T), \quad (4)$$

где $P_{classic}$ – это суммарное энергопотребление, затраченное узлом на подключение к сети при использовании классического подхода.

Аналогичным образом, в предлагаемом подходе к созданию сети на основе прокси-соединения (см. рис. 4) под-

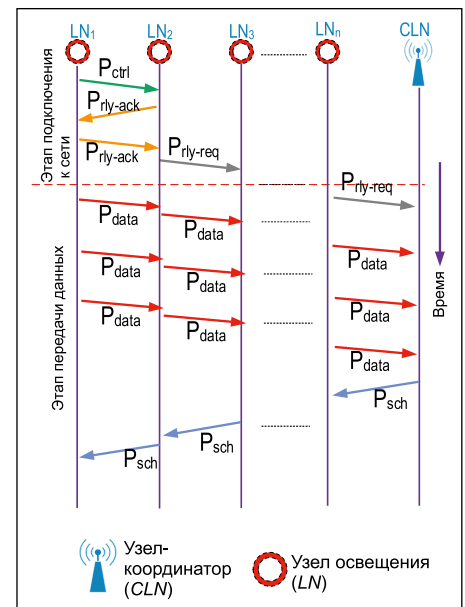


Рис. 4. Сетевое соединение через прокси

Значения энергопотребления для платформы *Nordic*

Пропускная способность, кГц	Скорость передачи данных, бит/с	Тип энергопотребления	Мощность, Вт
100	5,95E+05	P_{Tx}	0,0330
		P_{Rx}	0,0366
200	1,19E+06	P_{Tx}	0,0900
		P_{Rx}	0,0384
Нет сигнала		P_{Sp}	0,0003
		P_{LPL}	3,75E-05

Типы и размеры пакетов данных

Типа пакета	Длина (байт)
Пакет расписания (P_{sch})	Переменная
Контрольный пакет (запроса на подключение) (P_{ctrl})	32
Пакет ретрансляции (P_{rly})	52

ные, принадлежащие ему и соседним узлам. Если направление передачи направлено в сторону узла-координатора CLN , то передача идёт на узел $(n - 1)$, а если направление передачи направлено в обратную сторону от CLN , то она идёт на узел $(n + 1)$. В зоне покрытия каждого светильника есть два светильника: предыдущий и следующий. Схема рекомендованного метода временного разделения приведена на рис. 5.

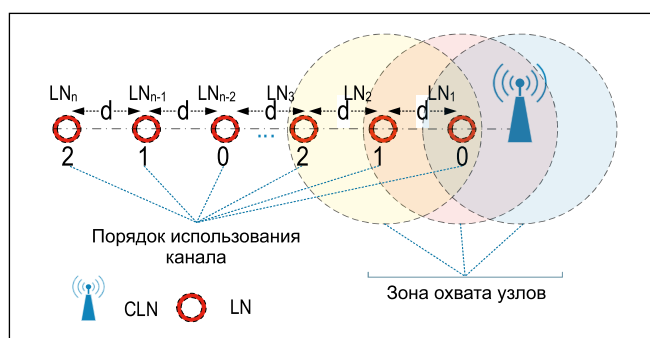
Как показано на рис. 5, метод временного разделения основан на последовательности использования канала узлом, согласованной с соседними узлами. При таком подходе используются два канала: канал управления и канал данных. Канал управления используется светильником для отправки соответствующих пакетов ($ctrl$, sch , $relay$) при запросе на подключение к сети. По мере приближения к узлу-координатору CLN обмен данными в канале увеличивается согласно свойству линейной топологии. В канале данных узлы освещения LN передают пакеты данных узлу-координатору CLN . Каждый узел передаёт как свои собственные данные, так и данные узлов нижнего порядка. Для этого канала используется предложенный метод временного разделения. Столкновения и заклинивание пакетов данных предотвращаются за счёт использования многоканальной структуры. На рис. 6 показаны временные слоты для узлов.

Каждый узел использует общий канал с соседними узлами в последовательности, указанной на рис. 6. Ниже представлено вычисление величины временного разделения [29]:

$$S_d = \left(\frac{T_p}{3} \right) \bmod (O_s, 3), \quad (7)$$

где T_p – период передачи пакета данных, S_d – временной слот узла, а O_s – порядок распределения каналов (0, 1, 2, ..., n).

Рис. 5. Схема рекомендованного метода временного разделения



ключение узла к сети происходит только за счёт обмена пакетом данных с соседним узлом, который присоединился к сети ранее. При первоначальном подключении нет необходимости ждать пакета расписания (P_{sch}), отправленного узлом-координатором CLN . За исключением соседнего узла освещения LN , другие узлы в сети, а также узел-координатор не расходуют энергию на этот процесс. Таким образом, при использовании рекомендованного подхода для подключения к сети через прокси общая энергия, затрачиваемая узлом на такое подключение, равна:

$$P_{proposed} = 3 \cdot (P_R + P_T). \quad (5)$$

Если размеры пакетов запроса на подключение (P_{ctrl}) и передачи (P_{rly}) постоянны (см. табл. 2), ясно, что количество энергии, затрачиваемое узлом на подключение к сети, не зависит от N_C и является постоянной величиной при использовании прокси согласно (5). Следовательно, количество энергии (P_j), затраченное на подключение к сети всеми узлами в структуре с количеством узлов n , соответствует классическому подходу $P_{jclassic} = n \cdot (n + 1) \cdot (P_R + P_T)$, в то время как рекомендованный подход

предусматривает прокси-соединение

$$P_{jproposed} = 3 \cdot n \cdot (P_R + P_T).$$

В результате, когда количество узлов в сети увеличивается, мощность, расходуемая при классическом подходе, растёт по экспоненте в зависимости от количества вовлечённых узлов, тогда как рекомендованный подход предусматривает линейный рост. Поскольку в сети всегда должны быть минимум два узла освещения LN и один узел-координатор CLN , сеть всегда будет $P_{jproposed} < P_{jclassic}$ ($n > 2$).

2.2. Новый метод временного разделения

При классическом подходе потери данных из-за столкновений пакетов происходят при одновременном использовании канала узлами освещения LN . Поэтому был предложен новый способ временного разделения для предотвращения одновременного доступа к каналу узлов освещения LN в зоне охвата других узлов при линейной топологии [29].

Предложенный метод временного разделения также реализован в канале связи, который узлы используют для передачи данных узлу-координатору CLN . При использовании данного метода узел на n -м уровне передаёт дан-

По мере подключения узлов освещения LN к сети определяется последовательность использования канала. Первому пользователю присваивается величина «0». Затем идут 1, 2, 3, ... n по порядку. Узлы освещения LN получают сведения о последовательности использования канала вместе с пакетами синхронизации при первом подключении к сети. При расчёте временных интервалов, как видно из (7), для равномерного распределения временных интервалов между узлами фиксированный период передачи пакета данных делится на 3, а порядок распределения канала умножается на режим работы беспроводной сети (3). Поскольку количество светильников увеличивается в соответствии с режимом использования канала (3), то оно периодически выдаёт результаты 0, 1 и 2. Поэтому светильник (LN) в беспроводной сенсорной сети не использует существующий канал одновременно с соседним светильником на протяжении всего периода работы. Это предотвращает столкновения пакетов и их заклинивание. Потерь данных нет.

3. Анализ параметров и результатов моделирования

При создании беспроводной сенсорной сети нет необходимости предварительно определять местоположение узлов датчиков. Однако в системах освещения расположение светильников известно точно. Для целей освещения используются различные протоколы для беспроводных сенсорных сетей для создания умной системы с дистанционным управлением [6, 21, 22, 30–33]. *Zigbee* и *GPRS* являются наиболее предпочтительным выбором при проведении исследований.

Zigbee повышает энергоэффективность, но обладает низкой пропускной способностью, поэтому его использования недостаточно, если требуется высокая скорость передачи данных. Наиболее распространённым протоколом после *Zigbee* является *GPRS* на основе *GSM*. Во многих исследованиях дистанционное управление в умных системах освещения реализовано с помощью *GPRS-GSM* [34–36].

Из-за неподходящей пропускной способности *Zigbee*, а также по причине высокого энергопотребления протоколов беспроводных сенсорных сетей

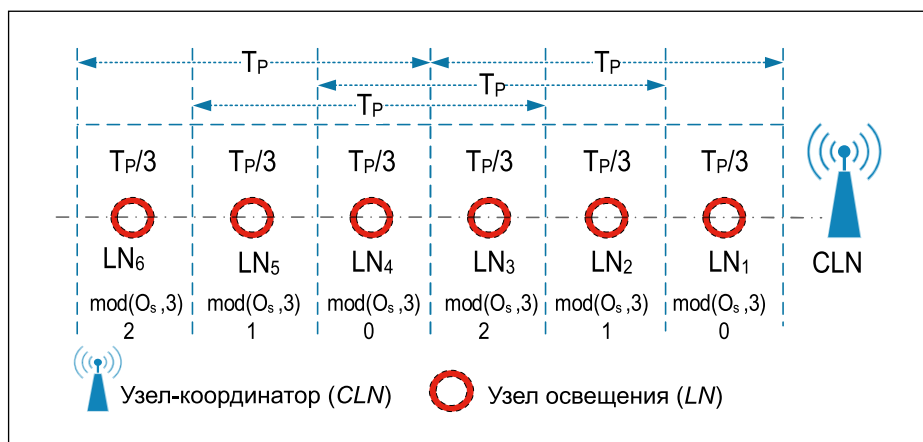


Рис. 6. Временные слоты для узлов

на основе *GPRS-GSM* в настоящем исследовании предпочтение отдаётся однопроцессорному трансиверу *nRF905* [37] с частотой 433/868/915 МГц, который является более современным устройством, прост в использовании и имеет очень низкое энергопотребление при обмене данными. Таким образом, в системе освещения для беспроводной сенсорной сети использовался *nRF905*.

Исследование проводилось для систем с 50, 100, 150 и 200 опорами дорожного освещения с линейной топологией. Моделирование было выбрано с целью более глубокого анализа параметров. Физическая реализация беспроводной сенсорной сети требует временных и трудозатрат. В этом случае от моделирования ожидаются реалистичные результаты.

Разработанная беспроводная сенсорная сеть была смоделирована в симуляторе *Riverbed Modeler*. *Riverbed Modeler* – это программное обеспечение для сетевого моделирования любых сетевых проектов [38]. Симулятор позволяет смоделировать мониторинг поведения сети, анализ производительности, провести тестирование её эффективности. При проектировании поведения модели используется программный язык *ProtoC* на основе *C*.

В *Riverbed Modeler* можно осуществлять дискретное моделирование событий для анализа разработанной сетевой модели [10, 23, 38–40].

В данном исследовании два типа узлов были разработаны в симуляторе:

узел-координатор для центрального административного пункта и узел освещения для светильников. Топологическое распределение системы освещения создавалось под линейную топологию для дорог и тоннелей. Смоделированная линейная топология системы освещения представлена на рис. 7.

Энергопотребление радиоузлов *Nordic*, используемых в моделях, указано в табл. 1 [8, 37].

Одним из параметров, влияющих на энергопотребление, является размер пакетов данных при обмене внутри беспроводной сенсорной сети. Таким образом, в беспроводных сенсорных сетях, разработанных в рамках данного исследования, используются три различных типа пакетов для подключения к сети и обеспечения её бесперебойной работы. Типы и размеры пакетов указаны в табл. 2. Размеры пакетов данных варьируются в зависимости от типа пересылаемых данных.

Узел-координатор отправляет пакет расписания для передачи информации о канале, выделенном для узла освещения. Контрольные пакеты предназначены для непосредственного соединения узлов освещения в сеть и обеспечения её непрерывной работы. Узлы освещения также используют пакеты ретрансляции для подключения к сети через другие узлы.

В рамках данного исследования были разработаны четыре различных сценария, параметры моделирования указаны в табл. 3.

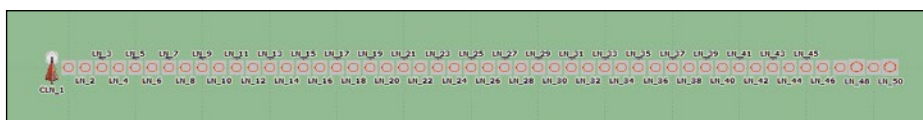


Рис. 7. Смоделированная линейная топология системы освещения

Параметры моделирования для сценариев

Сценарий/ кол-во узлов освещения, шт.	Зона охвата сети, м	Расстояние между узлами, м	Кол-во узлов- координаторов, шт.	Общая протяжённость сети, км
S50/50	120	25	1	1,25
S100/100	120	25	1	2,5
S150/150	120	25	1	3,75
S200/200	120	25	1	5

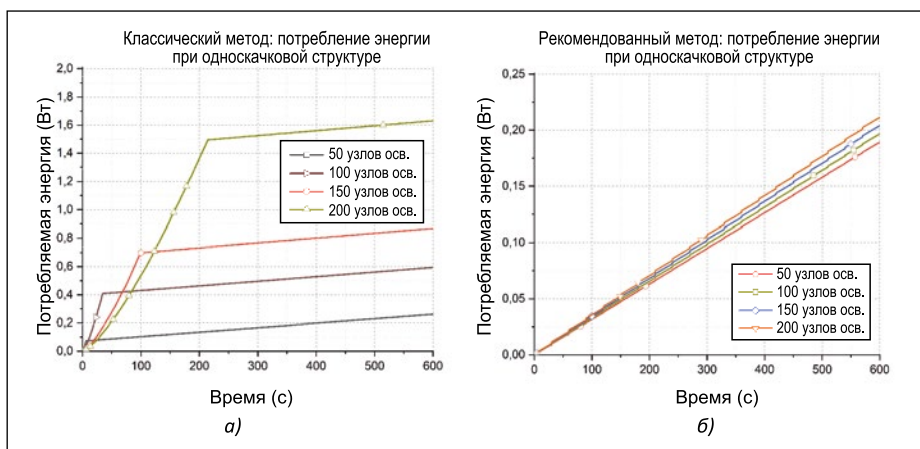


Рис. 8. Сравнение общего энергопотребления узла-координатора при использовании классического (а) и рекомендованного (б) подходов для односкачковой структуры

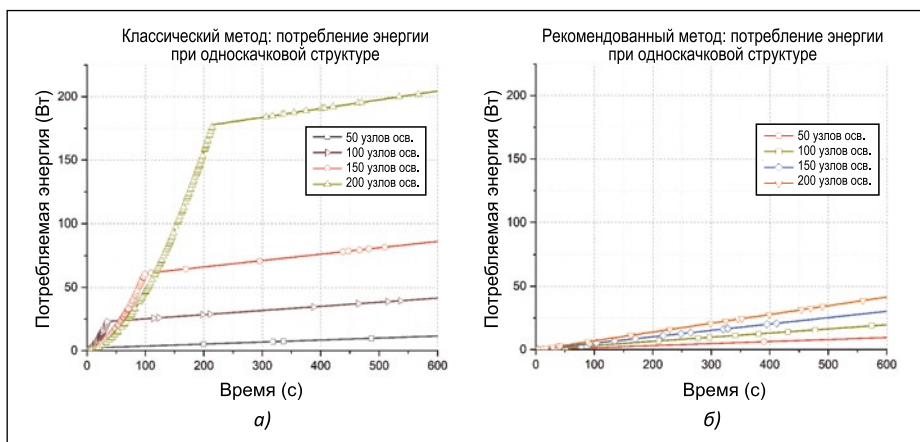


Рис. 9. Сравнение общего энергопотребления узлов освещения при использовании классического (а) и рекомендованного (б) подходов для односкачковой структуры

Для сценариев моделирования количество узлов освещения (LN) в беспроводной сенсорной сети (WSN) составляет 50, 100, 150 и 200 светильников, соответственно. Таким образом, наблюдается эффект увеличения количества узлов при линейной топологии.

Зона охвата световых датчиков составляет 120 м для формирования односкачковой структуры. В этом случае светильник в линейной сети взаимодействует только с двумя соседними светильниками.

4. Обсуждение результатов

Во всех сценариях, смоделированных в данном исследовании, использовался один узел-координатор. В ходе моделирования энергопотребление узлов освещения было исследовано в рамках сценариев с одно- и многоскачковой связью. Проведено сравнение сетей, созданных с использованием классических подходов и подходов, предлагаемых в данном исследовании.

Во-первых, на рис. 8 показано сравнение общего энергопотребления при использовании классического (а) и рекомендованного (б) подходов для односкачковой структуры с узлом-координатором как показано на рис. 8. При использовании классического подхода внезапная потребность в энергии возникает в момент подключения к сети. Энергия, потребляемая узлом-координатором в системе, состоящей из 200 светильников, где большая часть энергии потребляется в первый момент, составляет 1,5 Вт при подключении к сети всех узлов освещения. При использовании рекомендованного подхода в той же ситуации узел-координатор потребляет 0,0116 Вт. Преимущество при подключении всех узлов освещения сети достигает 99,23 %. Это объясняется следующим образом: при использовании классического подхода узлы освещения создают тяжёлый пакетный трафик при первоначальном подключении к сети. Узел-координатор обрабатывает каждый полученный запрос на соединение и отвечает на него, тем самым расходуя много энергии. Поскольку рекомендованный подход предусматривает прокси-соединение, процесс подключения выполняется не узлом-координатором, а непосредственно узлом освещения. Это снижает нагрузку на узел-координатор, уменьшая энергопотребление на этапе подключения узлов освещения. Для других сценариев характерна ситуация, описанная на рис. 8. При аналогичном подходе суммарное энергопотребление узлов освещения при одном скачке представлено на рис. 9. Видно, что при использовании классического подхода узлы освещения создают интенсивный пакетный трафик при первоначальном подключении к сети. В эксперименте с 200 узлами освещения (наиболее сложный сценарий) их энергопотребление достигло 175 Вт, а энергопотребление при использовании рекомендованного подхода составило 0,235 Вт. Достигнутое преимущество – 99,86 %.

На рис. 10 (а) показано количество энергии, расходуемой узлом-координатором во время смоделированной работы сети с 50, 100, 150 и 200 узлами освещения при использовании классического подхода с трехскачковой радиосвязью. В сценарии с 200 узлами освещения (наиболее

сложном сценарии при использовании классического подхода) процесс подключения всех узлов к сети занимает 225 с. В этот момент энергопотребление узла-координатора составило 0,552 Вт. При использовании рекомендованного подхода, как показано на рис. 10 (б), энергопотребление узла-координатора достигло всего 0,0086 Вт при наиболее сложном сценарии с одновременным подключением 200 узлов освещения. Соответственно, предлагаемый подход даёт преимущество в 98,35 % на этапе сетевого подключения узлов освещения по сравнению с классическим подходом.

Аналогично на рис. 11 показано сравнение общего энергопотребления узлов освещения при использовании классического (а) и рекомендованного (б) подходов для трёхскачковой структуры. При анализе работы сети с 200 узлами освещения (наиболее сложный сценарий при использовании классического подхода с трёхскачковой радиосвязью) выяснилось, что энергопотребление, необходимое для полноценного подключения к сети всех узлов освещения, составляет 39 Вт. Если использовать предлагаемый в данном исследовании подход, то энергопотребление не превышает 0,387 Вт при том же сценарии. В этом случае предлагаемый подход даёт преимущество в 99 %.

Для того чтобы оценить разницу в энергопотреблении для различных сценариев сети используя классический и рекомендованный в настоящем исследовании подходы, были построены графики.

На рис. 12 показано сравнение суммарного энергопотребления всех узлов освещения (кроме узла-координатора) при подключении к сети с одно-, двух- или трёхскачковой структурой с точки зрения использования классического и рекомендованного подходов. В данном исследовании было отмечено, что при использовании классического метода энергопотребление гораздо выше. Суммарное энергопотребление и экономия ресурсов по результатам моделирования работы сети с 200 узлами освещения (наиболее сложный сценарий) с одно-, двух или трёхскачковой структурой отражены в табл. 4.

На рис. 13 приводится сравнение энергопотребления узла-координатора во время работы в сети с одно-,

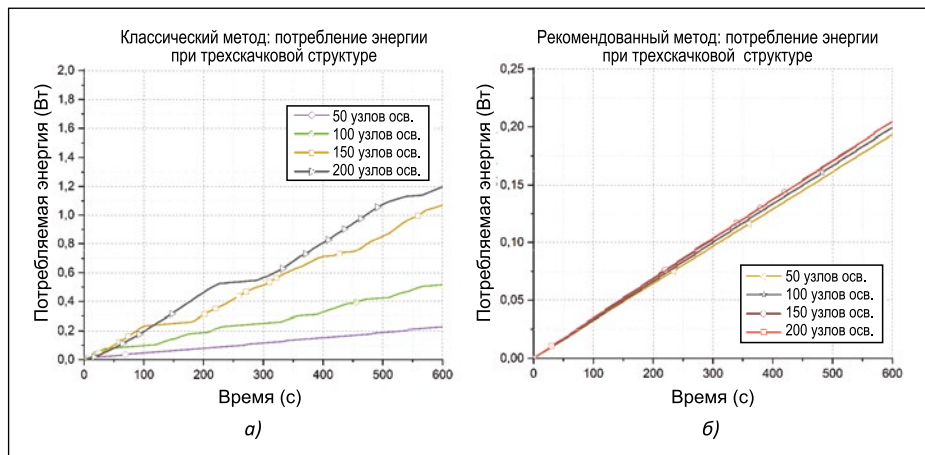


Рис. 10. Сравнение общего энергопотребления узла-координатора при использовании классического (а) и рекомендованного (б) подходов для трёхскачковой структуры

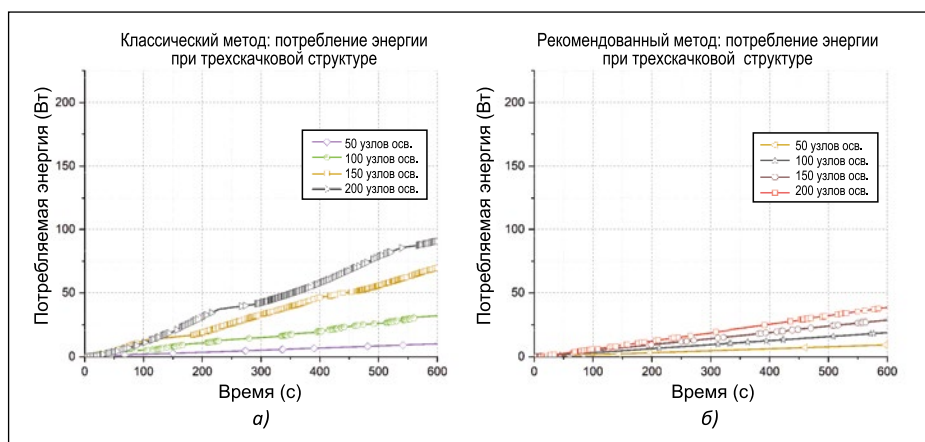
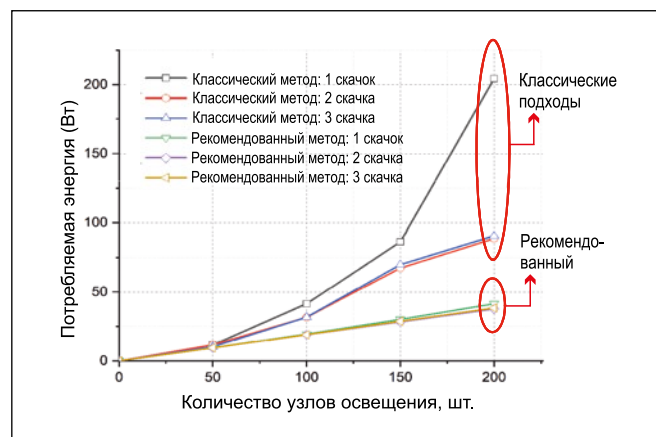


Рис. 11. Сравнение общего энергопотребления узлов освещения при использовании классического (а) и рекомендованного (б) подходов для трёхскачковой структуры

Рис. 12. Сравнение суммарного энергопотребления узлов освещения



двух или трёхскачковой структурой при использовании классического и рекомендуемого подходов. Во всех сценариях с 50, 100, 150 и 200 узлами освещения очевидно, что рекомендуемый метод намного эффективнее с точки зрения общего энергопотребления. Сравнение энергопотребления и экономии ресурсов для сценария линейной топологии с 200 столбами приводится в табл. 5.

В табл. 6 показано общее энергопотребление узла-координатора и 200 узлов освещения по количеству скачков при моделировании работы 200 узлов освещения, то есть при наиболее сложном сценарии. При сравнении классического и рекомендуемого подходов отмечается экономия ресурсов на уровне около 80 %, особенно для сетей с односкачковой структурой.

Общее энергопотребление узлов освещения по количеству скачков при моделировании работы 200 узлов освещения

	Один скачок	Два скачка	Три скачка
Классический (Вт)	205,92	89,71	91,81
Рекомендованный (Вт)	41,63	37,59	38,57
Преимущество (%)	~80	~58	~58

Таблица 4

освещения растёт максимальное количество скачков в системе. Каждый скачок означает дополнительную передачу пакета данных и её повтор, следовательно, расходуется больше энергии.

Рекомендуемый в настоящем исследовании подход к реализации беспроводной сенсорной сети с линейной топологией работает лучше, чем классический подход. Количество узлов освещения увеличивается, пакетный трафик в тех из них, которые расположены ближе к узлу-координатору, также растёт, однако столкновений пакетов данных не наблюдается. Сквозная задержка, один из наиболее важных параметров производительности при линейных топологиях, осталась на приемлемом уровне даже при увеличении количества узлов освещения. Все сценарии в настоящем исследовании предусматривают использование одного узла-координатора и разработаны для оптимальной производительности беспроводной сенсорной сети в заданных условиях. С другой стороны, по мере увеличения количества узлов-координаторов наблюдается более быстрое подключение узлов освещения к сети, а также уменьшение сквозной задержки. В данном исследовании в отношении всех узлов освещения в беспроводной сенсорной сети использовался рекомендуемый метод временного разделения для передачи данных и управления ею.

Общее энергопотребление узла-координатора по количеству скачков при моделировании работы 200 узлов освещения

	Один скачок	Два скачка	Три скачка
Классический (Вт)	1,63	1,08	1,20
Рекомендованный (Вт)	0,211	0,200	0,205
Преимущество (%)	~87	~81	~83

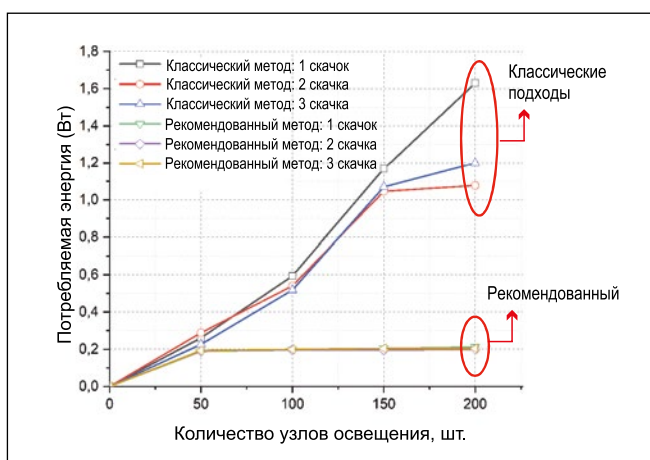
Таблица 5

Общее энергопотребление узла-координатора и 200 узлов освещения по количеству скачков при моделировании работы 200 узлов освещения

	Один скачок	Два скачка	Три скачка
Классический (Вт)	207,55	90,79	93,010
Рекомендованный (Вт)	41,841	37,79	38,775
Преимущество (%)	~80	~58	~58

Таблица 6

Рис. 13. Сравнение энергопотребления узла-координатора



5. Заключение

При использовании классического подхода во время первого подключения к сети узлов освещения расходуется больше энергии. Это связано с частым обращением к пакетам расписания, запроса на подключение, контроля и ретрансляции при первом включении системы. При использовании рекомендуемого метода сеть создаётся на основе прокси-соединения, что исключает возникновение выше-

помянутой ситуации. Рекомендуемый подход даёт преимущество в 98,23 % при использовании односкачковой структуры. Таким образом, на этапе подключения к сети, когда расходуется больше всего энергии, обеспечивается минимальное энергопотребление.

Рост общего энергопотребления особенно заметен при линейных сценариях. Основная причина такого скачка энергопотребления связана с увеличением количества светильников. С увеличением количества узлов

При моделировании было отмечено, что по мере увеличения количества узлов освещения при использовании классического подхода увеличивается продолжительность времени, в течение которого узлы активны в сети. Кроме того, в тех же сценариях с 50, 100, 150 и 200 узлами освещения время подключения узлов к сети увеличивается параболически (5, 18, 99 и 210 с соответственно). В беспроводных сенсорных сетях с большим количеством узлов такие периоды ещё дольше. Однако благодаря методу создания сети на основе прокси-соединения, предложенному в этом исследовании, отмечено, что такие периоды сокращаются до очень низких приемлемых значений (0,3, 0,89, 1,53 и 2,4 с). Кроме того, предложенные подходы обеспечивают более быстрое развёртывание сети. В случае возможного обрыва соединения сеть автоматически реорганизуется.

В результате, разработка методов реализации беспроводных сенсорных

сетей для систем освещения с акцентом на энергосбережение и быстродействие является обязательной с точки зрения производительности сети и эффективности её функционирования. Благодаря рекомендуемым настоящим исследованием решениям энергопотребление сократилось на 80 % и 58 % в зависимости от различных сценариев.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Dong P. Application of intelligent lighting control system in different sports events in sports venues. // *Light & Engineering*, 2018. V26, #4, pp. 165–171.
2. Cheng R. Classroom Lighting Energy-Saving Control System Based on Machine Vision Technology. // *Light & Engineering*, 2018. V26, #4, pp. 143–149.
3. Sun E. Solar Photovoltaic Power Generation Wireless Monitoring System Based on IOT Technology. // *Light & Engineering*, 2018. V26, #4, pp. 130–136.
4. Sanaz Bozorg Chenani, Rami-Samuli Rasanen, Eino Tetri. Advancement in Road Lighting. // *Light & Engineering*, 2018. V26, #2, pp. 99–109.
5. Iacomussi P., Rossi G., Soardo P. Energy saving and environmental compatibility in road lighting. // *Light & Engineering*, 2012. V20, #4, pp. 55–63.
6. Hao L., Gao J. Intelligent Lighting System of Urban Road Based on Internet of Things. // *Light & Engineering*, 2018. V26, #4, pp. 150–156.
7. Cao S. Intelligent Lighting Control System in Large-Scale Sports Competition Venues. // *Light & Engineering*, 2018. V26, #4, pp. 172–182.
8. 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.
9. Zou Q. Lighting and Control Design of Large-Scale Stadium Skating Competition. // *Light & Engineering*, 2018. V26, #4, pp. 183–190.
10. Ari D., Çibuk 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.
11. Çibuk M. A New Fast Network Joining Algorithm for Single-Hop Wireless Sensor Networks. // *Bitlis Eren Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi*, 2018. V7, #1, pp. 72–83.
12. Shrestha A., Xing L. A performance comparison of different topologies for wireless sensor networks // in 2007 IEEE Conference on Technologies for Homeland Security: Enhancing Critical Infrastructure Dependability, 2007. pp. 280–285.
13. Mamun Q. A Qualitative Comparison of Different Logical Topologies for Wireless Sensor Networks. Sensors, // *Light & Engineering*, 2012. V12, #11, pp. 14887–14913.
14. 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.

15. 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.
16. Cengiz M.S. Simulation And Design Study For Interior Zone Luminance In Tunnel Lighting. // *Light & Engineering*, 2019. V27, #2, pp. 42–51.
17. Yetgin H., Cheung K.T.K. El-Hajjar, M., Hanzo, L., A Survey of Network Lifetime Maximization Techniques in Wireless Sensor Networks. // *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 2017. V19, #2, pp. 828–854.
18. Cengiz M. S., Cengiz C. Numerical Analysis of Maintenance Factor for Tunnel and Road In Solid State Lighting, // in International GAP Renewable Energy and Energy Efficiency Congress, 2018. pp. 347–348.
19. Cengiz M. S., Cengiz C. Numerical Analysis of Tunnel LED Lighting Maintenance Factor. // *IJUM Engineering Journal*, 2018. V19, #2, pp. 154–163.
20. Cengiz M.S. The Relationship between Maintenance Factor and Lighting Level in Tunnel Lighting. // *Light & Engineering*, 2019. V27, #3, pp. 75–88.
21. Peixoto J. P. J., Costa D.G. Wireless visual sensor networks for smart city applications: A relevance-based approach for multiple sinks mobility. // *Future Generation Computer Systems*, 2017. V76, pp. 51–62.
22. Karun R., Johnny M. Street Light Commander System Using Zigbee Network of Devices. // *International Journal of Engineering and Innovative Technology (IJEIT)*, 2014. V4, #4, pp. 165–169.
23. Çibuk M., Ari D., Ağgün F., Relay Mechanism with Three-way Handshake for Wireless Sensor Networks, // in International Advanced Technologies Symposium (IATS17), 2017. pp. 3459–3466.
24. Bathla M., Sharma N. Topology Control in Wireless Sensor Networks. // *International Journal of Advances in Computer Networks and its Security*, 2009. pp. 161–164.
25. Varshney S., Kumar C., Swaroop A. Linear Sensor Networks: Applications, Issues and Major Research Trends, // in International Conference on Computing, Communication and Automation (ICCCA2015), 2015. pp. 446–451.
26. Chen Q., Wang K., Ying K., Miao C., Dai G. An Energy Efficient MAC Protocol for Linear WSNs. // *Chinese Journal of Electronics*, 2015. V24, #4, pp. 725–728.
27. Çibuk M., Ari D., Çınar H. A New Multi-Channel Algorithm Of Join The Network For Single Hop Multi-Node Sensor Networks, in International Engineering, Science and Education Conference – // IN-ESEC2016, 2016. #December, pp. 1–3.
28. Ari D., Çibuk M., Ağgün F. A New Proxy-Based Network Joining Method for Linear Wireless Sensor Networks, // in International Engineering and Natural Sciences Conference (IENSC2018), 2018. pp. 715–723.
29. Ari D., Çibuk M., Ağgün F. Doğrusal Kabloşuz Algılayıcı Ağlar için Yeni Bir Zaman Dilimleme Metodu, // in 1st International Engineering and Technology Symposium, 2018. pp. 1166–1170.
30. Srinath V., Srinivas S. Street Light Automation Controller using Zigbee Network and Sensor

with Accident Alert System. // *International Journal of Current Engineering and Technology*, 2015. V5, #4, pp. 2819–2823.

31. Bhargavi R., Busupalli P. Development of Automatic Street Light Illumination and Vehicle Speed Controlling System on Arm7 for Roadways. // *International Journal of Research in Advanced Engineering Technologies*, 2016. V5, #3, pp. 16–22.

32. Gomez C., Paradells J. Wireless Home Automation Networks- A Survey of Architectures and Technologies.pdf. // *CONSUMER COMMUNICATIONS AND NETWORKING*, 2010. #June, pp. 92–101.

33. Radmand P., Talevski A., Petersen S., Carlsen S. Comparison of industrial WSN standards. 4th IEEE International Conference on Digital Ecosystems and Technologies – // Conference Proceedings of IEEE-DEST 2010, DEST 2010, 2010. pp. 632–637.

34. Caponetto R., Dongola G., Fortuna L., Riscica N., Zuffacchi D. Power consumption reduction in a remote controlled street lighting system, in SPEED-AM 2008 – // International Symposium on Power Electronics, Electrical Drives, Automation and Motion, 2008. pp. 428–433.

35. Dingfang L., Suiping Q., Tundong L., Shouzhi Y., Funchun S. The design and realization of communication technology for street lamps control system. // *Proceedings of 2009 4th International Conference on Computer Science and Education, ICCSE2009*, 2009. pp. 259–262.

36. Nasirudin M. A., Za'bah U. N., Sidek O. Fresh water real-time monitoring system based on Wireless Sensor Network and GSM. // *Open Systems (ICOS)*, 2011 IEEE Conference on, 2011. pp. 354–357.

37. Nordic Semiconductor, nRF905 Single chip 433/868/915MHz Transceiver, 2008.

38. Riverbed, OPNET Technologies – Network Simulator, 2018. <https://www.riverbed.com/gb/products/steelcentral/opnet.html> (accessed May 02, 2018).

39. Vançin S., Erdem E. Design and simulation of advance MODLEACH for wireless sensor network, // *International Journal of Computer Networks and Applications (IJCA)*, 2015. V2, #3, pp. 135–143.

40. Cengiz M. S., Cengiz Ç. IOT and Lighting Automation, // *International Conference on Multidisciplinary, Engineering, Science, Education and Technology (IMESET'17 Baku)* Book of Abstracts, 12–14 July 2017, Baku, pp. 8.



Муса Чибук (Musa Çibuk), M. Sc., Ph.D.

Окончил Университет Фырат, Турция в 2002 г. С 2000 по 2010 год работал в Университете Фырат, а в настоящее время занимает должность декана

факультета компьютерной инженерии в Университете Битлис Эрен. Область научных интересов – беспроводные сенсорные сети, MAC-протоколы, компьютерные сети, цифровая связь и обработка изображений

Термический анализ радиаторов и кристаллов мощных светодиодных модулей при разных материалах теплового интерфейса¹

Д. РАУЛ, К. ГХОШ

Джадавпурский университет, Колката, Индия
E-mail: debashis.raul@gmail.com, kamalikhosh4@gmail.com

Аннотация

Оптические характеристики и надёжность светодиодов (СД) напрямую зависят от их самонагрева. Важное значение имеет рассеяние в окружающее пространство тепла, которое вырабатывается СД, и обеспечение таких же, как заявленные производителями, характеристик СД источников света. Тепловые интерфейсы размещают между радиатором и источником света для уменьшения контактного сопротивления на границе между подложкой и радиатором СД модуля. В данной работе проведена оценка материалов тепловых интерфейсов (МТИ). При этом рассмотрены как характеристики применяемых на практике МТИ, так и связанные с их использованием проблемы. Это исследование позволит рассчитывать распределение температуры радиатора при использовании МТИ разных типов с разными значениями теплопроводности, определять возможности радиатора в части рассеяния тепла и соответствующим образом конструировать радиатор. Кроме того, при помощи моделирующего пакета программ COMSOL применительно к СД матрицам с бескорпусным монтажом кристаллов на печатной плате (CoB СДМ) проведено исследование имеющих разную толщину МТИ при разных значениях входного тока. Полученные результаты говорят о том, что при увеличении входного тока и толщины слоя МТИ имеет место увеличение температуры $p-n$ -перехода и уменьшение срока службы СДМ.

Ключевые слова: способность к рассеянию тепловой энергии, радиатор, температура $p-n$ -перехода, световой поток, материал теплового интерфейса, тепловая прокладка.

1. Введение

В современном мире твердотельные осветительные устройства, такие как светодиоды (СД), имеют преимущество перед всеми традиционными источниками света, что обусловлено их низким энергопотреблением, большими сроками службы, экологической безопасностью и мгновенным зажиганием. В настоящее время реальные световые потоки СД устройств не соответствуют заявленным производителями. При этом многие производители перегружают СД для увеличения их световых потоков. Это послужило причиной проведения экспериментальных исследований зависимости фотометрических характеристик СД от времени при разных значениях питающего тока [1]. Опыт практического применения СД показал, что ненадлежащее рассеяние тепла приводит к отказам СД. Поэтому для светильников с СД большое значение имеет управление их тепловым режимом [2, 3], так как увеличение температуры $p-n$ -перехода приводит к уменьшению светового потока, световой отдаче и, конечно, надёжности этих светильников [4–7].

При увеличении тока питания СД увеличивается, конечно, и его световой поток [8], но при этом увеличиваются и выделение тепла, энергопотребление и т.д. А при увеличении температуры $p-n$ -перехода световой поток СД уменьшается. В [9] описан метод определения температуры $p-n$ -перехода на основе генерируемого в устройстве фототока. В [10] предложена динамическая система измерения температуры $p-n$ -перехода СД, калибровка которой включает в себя калибровку самого прибора и калибровку k -фактора. При этом в рамках динамического исследования температуры $p-n$ -перехода было проанализировано влияние быстрого переключения и определены погрешности измерений, обусловленные задержкой

выборки (*sampling delay*). Кроме того, в [10] был проведён сравнительный эксперимент, направленный на подтверждение точности этой системы, продемонстрировавший хорошее соответствие между экспериментальными данными и опорными значениями. В [11] для измерения температуры $p-n$ -перехода СД был изготовлен гибкий температурный микродатчик сопротивления, которым определение температуры производилось исходя из линейной зависимости между температурой и сопротивлением. В [12] реализована основанная на термосопротивлении аналитическая модель мощных СД матриц (СДМ) с бескорпусным монтажом кристаллов на печатной плате (CoB СДМ) и подложкой для силовых электронных приборов; правильность этой модели была подтверждена посредством сравнения с результатами анализа, проведённого методом конечных элементов. Эта модель позволила понять влияние конструктивных параметров (например, свойств материалов, расстояния между СД, толщины подложки и т.д.) на тепловое сопротивление СД. В [13] рассмотрено влияние сжатия тока на тепловое сопротивление СД и его изменение при изменении питающего тока. В этой работе проведено теоретическое и экспериментальное исследование растекания тока в мощных СД с перевёрнутыми кристаллами и его влияние на тепловое сопротивление. В [14] различные токи использовались для определения температуры $p-n$ -перехода мощных СД при равной 1 МГц частоте опроса.

В [15] исследование распределения температуры устройства с СДМ было проведено при помощи числовых моделей переноса тепла и соединения терморезисторов, а также трёхмерной вспомогательной модели этого устройства, позволяющей проводить расчёты методом конечных элементов. Это обеспечило возможность прогнозировать температуры кристалла и всей системы в целом и облегчило расчёт влияния на работу устройства с СДМ таких параметров, как плотность компоновки СДМ и плотность энерговыделения, а также позволило провести сравнение активных и пассивных способов охлаждения. Прямое измерение температуры $p-n$ -перехода СД очень затруднительно, поэтому был разработан альтернативный метод, основанный на вольт-ампер-

¹ Перевод с англ. Е.И. Розовского

Характеристики СДМ

СДМ	Мощность, Вт	Входной ток (постоянный), мА	Входное напряжение (постоянного тока), В	КЦТ, К	Размеры (диаметр x высота), мм	Материал радиатора
CoB СДМ холодно-белого света	5	300	18	6500	75×22	Алюминиевый сплав
SMD СДМ холодно-белого света	3	300	18	6500	90×55	Алюминиевый сплав

ных характеристиках мощных серийно выпускаемых СД. Этот метод был использован для измерения шести различных температур в диапазоне от 295 до 400 К [16]. Было проведено сравнение тепловых характеристик различных предназначенных для мощных СД подложек, таких как стандартная стеклотекстолитовая подложка (*FR4*) и изолированная металлическая подложка (*IMS*), и при этом основное внимание было обращено на стоимость и размеры [17]. Более полное понимание теплового режима работы СДМ можно обеспечить посредством проведения углублённого анализа переноса тепла при работе устройства [18]. Причины отказа СД являются одной из важнейших проблем, которые необходимо решить. Главные виды отказов, такие как дефекты клеевых соединений, некачественное закрепление кристаллов и иные дефекты, связанные с плохим корпусированием, были проанализированы на примере целого ряда отказов [19]. Мощные СДМ, корпусированные с линзами разной формы и разных размеров, были исследованы после испытания на тепловое старение как экспериментальными, так и численными методами [20].

Хотя заявленные сроки службы СД очень велики, в тропических странах они оказываются очень малыми. Поэтому были проведены экспериментальные исследования температуры основных элементов имеющихся в продаже мощных СДМ, таких как кристалл и радиатор [21, 22]. В качестве ускоряющих процессы факторов рассматривались влажность и высокая температура окружающей среды, особенно при исследованиях механизмов отказов, связанных с оптической деградацией [23, 24]. В [23, 24] эксперименты проводились с использованием имеющих различные теплопроводности материалов тепловых интерфейсов (МТИ) трёх типов. Основное назначение МТИ состоит в устранении воз-

Рис. 1. Выбранные СДМ с внешними устройствами управления



душных зазоров или объёмов (которые действуют как теплоизоляторы) из области интерфейса для максимизации передачи тепла. Температура дальней поверхности радиатора измерялась с интервалом до 1 ч, и полученные результаты были проанализированы. Ещё одно моделирование было проведено применительно к СДМ с бескорпусным монтажом кристаллов на печатной плате (*CoB* СДМ) при разных значениях входного тока и толщины слоя МТИ, и результаты моделирования были проанализированы.

В данной работе описана методика проведения эксперимента, проведён анализ полученных экспериментальных данных (температура дальней поверхности радиатора) и выведена новая формула для расчёта температуры *p-n*-перехода СД, которую нельзя измерить непосредственно. Была также выведена эмпирическая формула, позволяющая оценить или рассчитать температуру поверхности радиатора по истечении разного времени работы СД. В рамках данной работы увеличивали питающий ток СД и толщину слоя МТИ, что приводит к увеличению температуры *p-n*-перехода СДМ и уменьшению её срока службы.

2. Выбор СДМ и материала теплового интерфейса

В данной работе использовались по десять выпускаемых одним производителем и имеющих одинаковую структуру светящихся вниз (даунлайт)

серийных СДМ с бескорпусным (*CoB*) и поверхностным (*SMD*) монтажом кристаллов на печатной плате (рис. 1). МТИ двух типов были приобретены, а не предоставлены производителем. Характеристики СДМ и материалов приведены в табл. 1 и 2 соответственно. Радиатор из алюминиевого сплава окружает корпус СДМ сзади. Типичные устройства управления расположены вне СДМ.

3. Методика проведения экспериментов

3.1. Измерение световых потоков СДМ и температуры радиатора

В рамках этой методики выбранные серийные светильники с *CoB* СДМ и с *SMD* СДМ, которые были предоставлены производителем, один за другим помещались в интегрирующую сферу для измерения их фотометрических и электрических характеристик. Температура в окрестности расположенного внутри интегрирующей сферы СДМ поддерживалась равной 25 °С. СДМ выдерживались при этой температуре до достижения термического равновесия, что занимало примерно 45 мин, после чего их включали в номинальный режим работы. Время стабилизации параметров работающего в интегрирующей сфере СДМ во всех случаях составляло 30 мин. Затем в соответствии с индийским стандартом *IS:16106,2012* из-

Характеристики МТИ

Наименование материала	Коэффициент теплопроводности, Вт/(м·К)	Типичная толщина, мм
Тип 1: термопаста	0,50	0,0825
Тип 2: несиликоновая термопаста	0,72	0,0825
Тип 3: термопрокладка	0,90	0,3–0,32

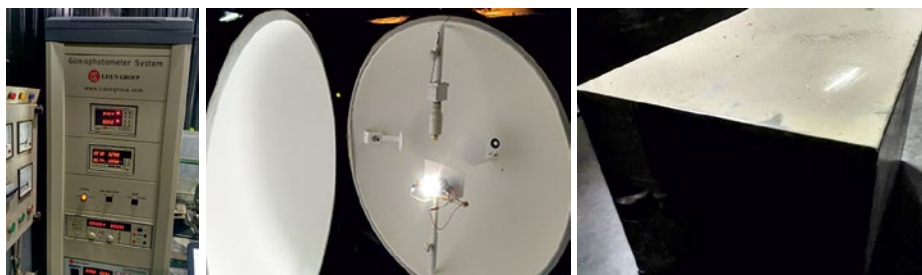


Рис. 2. Экспериментальная установка

меряли фотометрические характеристики, т.е. световой поток, СДМ. Измерения фотометрических и электрических характеристик СДМ осуществлялись в соответствии с рекомендациями *IESNA LM-79* в части измерений фотометрических и электрических характеристик изделий с СД. Следующим шагом было измерение температуры поверхности радиатора. Для этого использовалась изготовленная из фанеры камера размером 350×350×350 мм, температура внутри которой в соответствии с требованиями Объединённого инженерного совета по электронным устройствам (*JEDEC*) [25] поддерживалась равной 25–27 °С. Каждый из СДМ устанавливался горизонтально в геометрическом центре камеры, после чего на расстоянии полфута (16 см) от дальней поверхности радиатора помещался тепловизор *Ti400* производства компании *Fluke*. Температуру дальней поверхности радиатора регистрировали сразу же после включения СДМ, а затем через каждые 5 мин в течение часа. При этом МТИ был тем же, что и используемый производителем при изготовлении СДМ, а именно, термопаста (тип 1, коэффициент теплопроводности 0,50 Вт/(м·К)). Во время проведения тепловизионных измерений относительная влажность в камере составляла 45 %.

Затем используемый производителем МТИ удалялся, после чего между подложкой и радиатором размещали другой МТИ, а именно, несиликоно-

вую термопасту (тип 2) с более высокой теплопроводностью, равной 0,72 Вт/(м·К), и описанные выше измерения проводили применительно ко всем СДМ, после чего этот имеющий более высокую теплопроводность несиликоновый МТИ также удаляли и заменяли на термопрокладку (тип 3). Затем вновь проводили описанные выше измерения фотометрических и электрических характеристик.

В каждом случае описанные выше измерения проводились по десять раз, и полученные средние результаты использовались при проведении расчётов и построении приведённых ниже графиков.

Фотометрические характеристики (световой поток) СДМ обоих типов (и *CoB*, и *SMD*) измеряли при помощи фотометрического шара диаметром 1,0 м. В качестве фотоприёмника использовался хромометр *CL 200A* компании *Konica Minolta*. При проведении измерений температура в окрестности СДМ поддерживалась равной примерно 25 °С. Для этого в интегрирующую сферу был помещён дополнительный термометр. Температура поверхности радиатора измерялась при помощи тепловизора *Ti400* производства компании *Fluke*. *Ti400* имеет температурную чувствительность ≤ 0,05 °С при 30 °С. Выходные напряжение постоянного тока и ток устройства управления измерялись в точках подключения этого устройства к СДМ. В данной работе все СДМ работали

3.2. Модель *CoB* СДМ

Для проведения исследований был выбран *CoB* СДМ мощностью 5 Вт. Диаметр и высота алюминиевого радиатора были равны, соответственно, 75 и 22 мм. При моделировании тепловых процессов в роли источника тепла выступает кристалл, диаметр и высота которого составляли, соответственно, 2 и 0,1 мм. Трёхмерная модель СДМ была сформирована при помощи пакета программ *COMSOL*. СДМ соединялся с радиатором при помощи МТИ типа 1 (обычно используемая производителем термопаста с коэффициентом теплопроводности 0,50 Вт/(м·К)), типа 2 (предлагаемая термопаста с коэффициентом теплопроводности 0,72 Вт/(м·К)) и типа 3 (предлагаемая термопрокладка с коэффициентом теплопроводности 0,90 Вт/(м·К)). Начальная толщина МТИ типов 1 и 2 была равна 0,0825 мм,² тогда как МТИ типа 3 имел толщину 0,1 мм. В модели *CoB* СДМ для всех вариантов МТИ была сформирована сетка. Токи питания СДМ были выбраны равными 80, 130, 180, 230 и 300 мА, а входное напряжение СДМ было равно 18 В постоянного тока. При указанных значениях тока питания потребляемая СДМ мощность была равна, соответственно, 1,44, 2,34, 3,24, 4,14 и 5,4 Вт. Что касается эффективности СДМ, то считалось, что 80 % потребляемой СДМ мощности рассеивалось в виде тепла. Так что в сформированной при помощи *COMSOL* модели тепловыделение было задано равным 0,92·10⁹, 1,49·10⁹, 2·10⁹, 2,63·10⁹ и 3,4·10⁹ Вт/м³ соответственно. Применительно к этому моделированию граничные условия на всех поверхностях рассматриваемого СД модуля устанавливались в соответствии с равной 25 °С (300 К) температурой окружающей среды.

Для последующего моделирования были выбраны МТИ типов 2 и 3. Толщина каждого из МТИ выбиралась вдвое большей (0,165 мм в случае МТИ типа 2 и 0,2 мм в случае МТИ типа 3). После этого сформированная в *COMSOL* модель оставалась такой же, как и ранее, и использовалась для получения значений требуемых параметров.

² Потрясающая точность! – Прим. пер.

Световые потоки при использовании разных МТИ между подложкой СДМ и радиатором

МТИ →	Тип 1: термопаста	Тип 2: термопаста	Тип 3: термопрокладка
Теплопроводность, Вт/(м·К) →	0,50	0,72	0,90
Типы СДМ ↓	Средний световой поток, лм		
CoB СДМ мощностью 5 Вт	493,90	513,70	521,25
SMD СДМ мощностью 5 Вт	392,00	412,40	435,76

Температура поверхности радиатора при использовании трёх типов МТИ

Тип СДМ	CoB СДМ мощностью 5 Вт			SMD СДМ мощностью 5 Вт			
	МТИ	Тип 1: термопаста	Тип 2: термопаста	Тип 3: термопрокладка	Тип 1: термопаста	Тип 2: термопаста	Тип 3: термопрокладка
Теплопроводность, Вт/(м·К)		0,50	0,72	0,90	0,50	0,72	0,90
Время, мин ↓		Средняя температура, °С			Средняя температура, °С		
Начальный момент		38,4	39,2	39,8	37,1	39,3	39,7
1		39,6	43,3	47,3	37,3	39,6	44,8
5		40,7	45,4	49,0	39,8	40,2	54,6
10		41,7	46,8	50,6	39,2	45,2	59,2
15		41,6	47,1	51,5	38,4	44,8	59,4
20		42,3	47,5	51,3	39,6	46,7	61,6
25		42,8	47,7	51,5	39,3	46,8	66,4
30		42,5	47,2	51,9	40,3	46,7	70,7
35		42,7	47,2	51,8	41,8	48,0	70,8
40		43,1	47,3	52,0	40,5	48,9	69,8
45		43,8	47,6	51,8	41,9	48,6	68,8
50		44,0	47,3	51,7	42,6	47,0	69,4
55		44,9	47,4	51,8	43,5	48,6	70,3
60		45,2	47,8	51,7	43,3	49,0	69,7

4. Результаты и анализ

4.1. Распределение температуры по поверхностям радиаторов СДМ при использовании МТИ разных типов

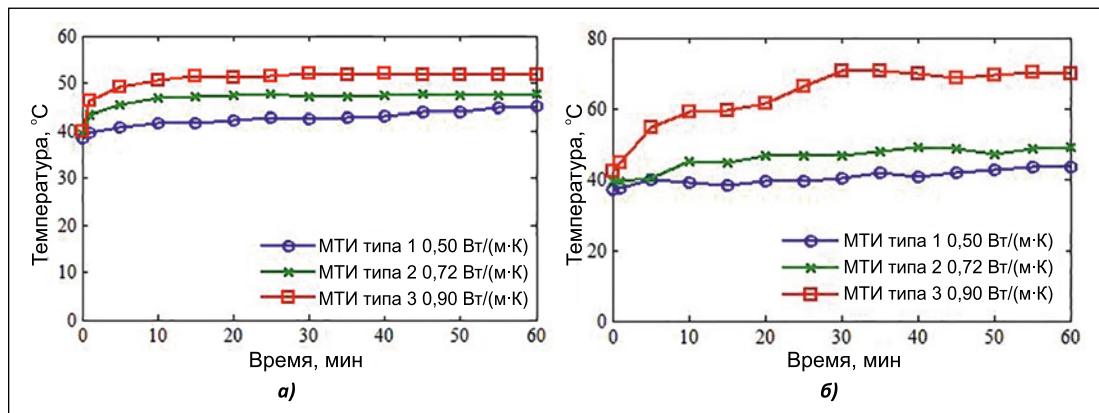
Оптические параметры измеряли применительно к СДМ двух типов при помещении различных МТИ между подложкой и радиатором. В данной работе использовали МТИ трёх типов, имеющие разные теплопроводности (табл. 2). В каждом рассмотренном случае измеряли световой поток СДМ. Эти оптические параметры измерялись десять раз, и средние результаты измерений приведены в табл. 3.

Номинальный световой поток *CoB* СДМ мощностью 5 Вт больше номинального светового потока *SMD* СДМ мощностью 5 Вт. В данной работе ясно показано, что на световой поток непосредственно влияет теплопроводность МТИ, который используется с СДМ. При увеличении теплопроводности увеличивается и световой поток СДМ. Из-за низкой теплопроводности термопасты тепло накапливается на границе между подложкой СДМ и радиатором, что приводит к увеличению температуры кристаллов СДМ и достижению ею высокого уровня, а это приводит к ухудшению генерации фотонов и, как следствие, к уменьшению светового потока. Так что рассеяние

тепла кристаллами СДМ является одним из важных факторов, влияющих на возможность обеспечения номинального светового потока СДМ рассматриваемых типов, которую можно улучшать за счёт использования МТИ с более высокой теплопроводностью.

Температуру поверхности радиатора измеряли при работе СДМ обоих типов. Её измеряли сразу же после включения СДМ, а затем через каждые 5 мин в течение часа. В табл. 4 приведены зависимости средней температуры поверхности радиатора для СДМ обоих типов и всех трёх имеющих разную теплопроводность МТИ. Экспериментальные результаты, приведённые на рис. 3, демонстрируют за-

Рис. 3. Зависимость температуры поверхности радиатора от времени для CoB СДМ мощностью 5 Вт (а) и SMD СДМ мощностью 5 Вт (б) при равной 25 °С температуре окружающей среды и использовании трёх типов МТИ



висимости температуры поверхности радиатора от продолжительности работы СДМ для всех трёх типов МТИ.

Связь между температурой поверхности радиатора (T) и продолжительностью работы СДМ (t) можно описать при помощи следующего уравнения:

$$P = C \cdot \rho \cdot V \cdot (dT/dt) + \alpha \cdot S \cdot (T - T_{amb}), \quad (1)$$

где P – мощность СДМ, C – удельная теплоёмкость материала радиатора (алюминия), ρ – плотность материала радиатора (алюминия), V – объём радиатора, α – коэффициент теплоотдачи, S – площадь поверхности радиатора, T_{amb} – температура окружающей среды.

Решив уравнение (1), получаем:

$$T = T_{amb} + (P/(\alpha \cdot S)) \times \{1 - \exp[-\alpha \cdot S/(C \cdot \rho \cdot V) \cdot t]\}, \quad (2)$$

или

$$T = T_{amb} + a_1 \cdot [1 - \exp(-a_2 \cdot t)], \quad (3)$$

где $a_1 = P/(\alpha \cdot S)$, $a_2 = \alpha \cdot S/(C \cdot \rho \cdot V)$. Уравнение (3) позволяет аппроксимировать измеренные зависимости температуры поверхности радиатора от продолжительности работы СДМ.

Температура в зоне p - n -перехода работающего СДМ в процессе измерений обычно увеличивалась, и в конце концов тепло отводилось от кристаллов СДМ и рассеивалось поверхностью радиатора. Рассеяние тепла обычно зависит от теплопроводности материалов, используемых при корпусировании СДМ. Вследствие низкой теплопроводности МТИ отвод тепла в окружающую среду затруднён. Как видно на рис. 3, как в случае CoB СДМ, так и в случае SMD СДМ рассеяние тепла с поверхности радиатора

ра возрастает при использовании МТИ с высокой теплопроводностью. При этом тепло, вырабатываемое в зоне p - n -перехода, лучше отводится к радиатору, что приводит к уменьшению избыточного нагрева кристаллов. Это очень полезно для СДМ, так как позволяет поддерживать должный световой поток и увеличивает надёжность СДМ.

Использование ИК датчика или термопары для измерения температуры p - n -переходов СД в нормальных условиях очень затруднительно и не позволяет получить точные результаты. В свет преобразуется только 20–30 % подаваемой на СД электрической мощности, тогда как остальная мощность преобразуется в тепло, которое повреждает СД. Поэтому большое значение имеет отвод тепла, выделяющегося в области p - n -перехода, в окружающее СД пространство. Имеющиеся в настоящее время на рынке СДМ обычно работают не в лучшем температурном режиме, что связано с недостатком информации о температуре p - n -перехода кристаллов СД. Так что производители нуждаются в простом методе прогнозирования температуры p - n -перехода СДМ, позволяющем оценить эту температуру и сконструировать светильники с СД, имеющие прекрасную систему рассеяния тепла.

В настоящее время значения параметра ψ_{JH} , характеризующего теплоотдачу (*thermal characterization parameter*), производители СДМ получают от производителей СД кристаллов. В то же время разработчики СДМ имеют возможность измерять температуру на дальнем конце радиатора, позволяющую определять температуру p - n -перехода на основе формулы для расчёта ψ_{JH} , приведённой JEDEC применительно к передаче тепла от p - n -перехода к радиатору:

$$\psi_{JH} = (T_j - T_H)/P_d, \quad (4)$$

$$T_j = P_d \cdot \psi_{JH} + T_H, \quad (5)$$

где T_j и T_H – температура p - n -перехода и радиатора соответственно, P_d – приложенная мощность. ψ_{JH} измеряется в °C/Вт.

4.2. Результаты, полученные при моделировании СДМ

Моделирование позволяет рассчитывать распределение температуры объекта и протекающие в нём тепловые потоки. На рис. 4 показан СДМ, включающий в себя кристалл, монтажную площадку, МТИ (термопасту типов 1 или 2 или термопрокладку (тип 3)) и алюминиевый радиатор.

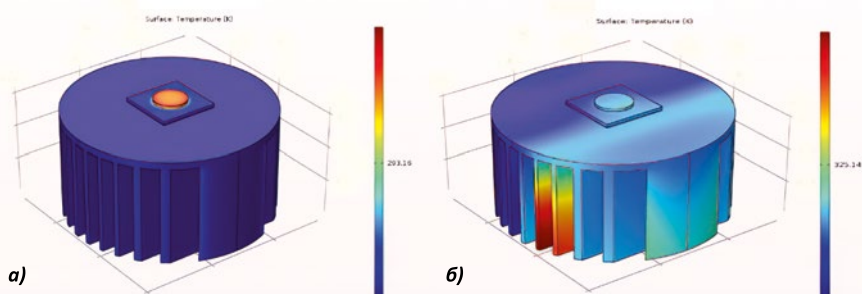


Рис. 4. Рассчитанное при помощи пакета программ COMSOL распределение температуры в случае CoB СДМ: а – в начальный момент времени, б – по истечении 1 ч

**Зависимость температуры поверхности радиатора от времени
в случае СоВ СДМ**

Время горения, мин	Измеренная температура, °С*	Расчётная температура, °С
Начальный момент	39,8	27,1
1	47,3	28,2
5	49,0	33,5
10	50,6	39,0
15	51,5	47,3
20	51,3	49,5
25	51,5	49,5
30	51,9	49,7
35	51,8	50,5
40	52,0	50,9
45	51,8	51,8
50	51,7	52,1
55	51,8	52,5
60	51,7	53,1

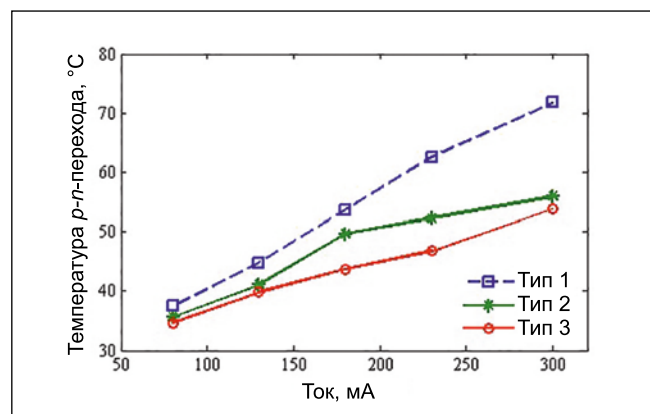
Для расчёта изменения температуры во времени при помощи пакета программ COMSOL было произведено моделирование переходных процессов методом конечных элементов. Считалось, что тепло передаётся от источника тепла (СД кристаллов) к радиатору, а затем посредством конвекции оно рассеивается в окружающем воздухе. Значения теплового потока, протекающего через нижнюю/наружную поверхность радиатора, а также температура p - n -перехода, были получены в результате теплового анализа модели СДМ. В этой модели перенос тепла осуществляется посредством теплопроводности. Результаты моделирования регистрировались для промежутка времени, равного 1 ч.

4.2.1. Распределение температуры в случае, когда с СоВ СДМ в качестве МТИ используется термопрокладка

Измеренные и рассчитанные посредством моделирования изменения температуры радиатора во времени (когда в качестве МТИ используется термопрокладка) приведены в табл. 5. Измерения температуры поверхности радиатора производились при включённом устройстве. Начальная температура измерялась при помощи тепловизора. Под начальным понимается момент, соответствующий минимальному промежутку времени после включения устройства, которое требуется для измерения температуры, причём к этому моменту температура, конечно, уже начинает увеличиваться. Применительно к моделированию, начальным является момент, в точности совпадающий с моментом включения устройства. Так что при моделировании начальный результат был почти идеальным, т.е. соответствующим температуре окружающего воздуха, и поэтому измеренное начальное значение температуры оказалось выше расчётного. Во время проведения измерений температура окружающего воздуха поддерживалась равной 27 °С. Выделяемое кристаллом тепло отводится к радиатору, а затем рассеивается в окружающий воздух, так что увеличение температуры СДМ не может быть слишком большим. Типичное расчётное распределение температуры радиатора, которое продемонстрировано на рис. 4, похоже на имеющее место в действительности.

* Данные, приведённые в этом столбце и в табл. 4, вызывают недоумение. Действительно, как сказано выше, радиатор имеет диаметр 7,7 см и высоту 2,2 см, то есть его объём V равен примерно 97 см³. Даже если пренебречь отводом тепла от радиатора, для его нагрева до температуры, скажем, $T_1 = 47,3$ °С (которая согласно табл. 5 имела место по истечении 1 мин работы СДМ) требуется энергия $E_1 \leq C \cdot \rho \cdot V \cdot (T_1 - T_{amb})$. А так как радиатор изготовлен из алюминия, то $E_1 \leq 0,9$ Дж/(г·К) · 2,7 г/см³ · 97 см³ · (47,3–27) К ≈ 4785 Дж, и даже если вся потребляемая СДМ мощность $P = 5$ Вт будет расходоваться на нагрев радиатора, то на нагрев радиатора до приведённой в табл. 5 температуры 47,3 °С потребуется время t_1 , не меньшее, чем $E_1/P \leq 4785/5 = 957$ с ≈ 16 мин, а не 1 мин, как это следует из табл. 5. – Прим. перев.

Рис. 5. Зависимость температуры p - n -перехода от входного тока в случае СоВ СДМ при использовании трёх типов МТИ



4.2.2. Анализ зависимости результатов моделирования от толщины МТИ и питающего тока в случае СоВ СДМ

Моделирование проводилось двояким способом. Вначале для всех трёх МТИ рассчитывали зависимости температуры p - n -перехода СоВ СДМ от

питающего тока при неизменной толщине МТИ (рис. 5), а затем рассчитывали зависимости температуры p - n -перехода как от толщины МТИ, так и от питающего тока (рис. 6). Как видно на рис. 5, при увеличении тока СДМ температура p - n -перехода увеличивается (почти) линейно. Наибольшее значение температуры p - n -перехода (по-

Рис. 6. Зависимость температуры p - n -перехода от входного тока при разной толщине МТИ типов 2 (а) и 3 (б)

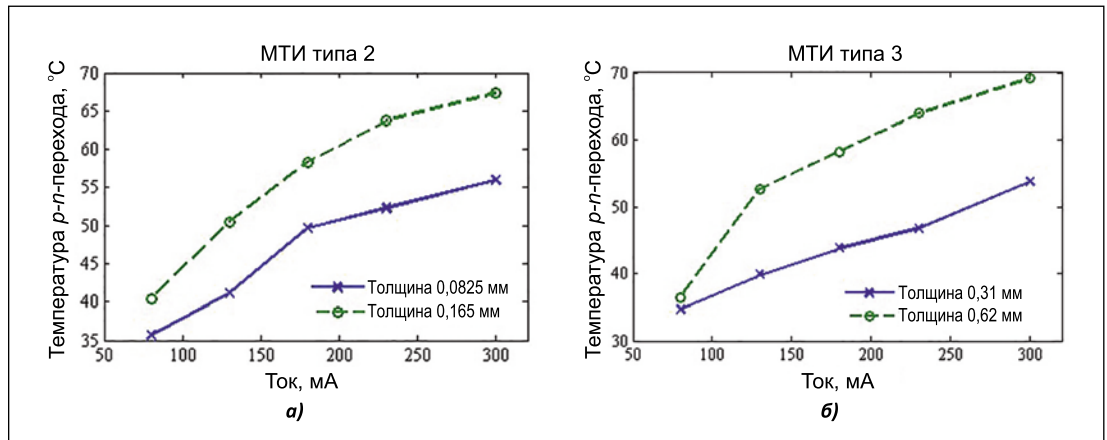
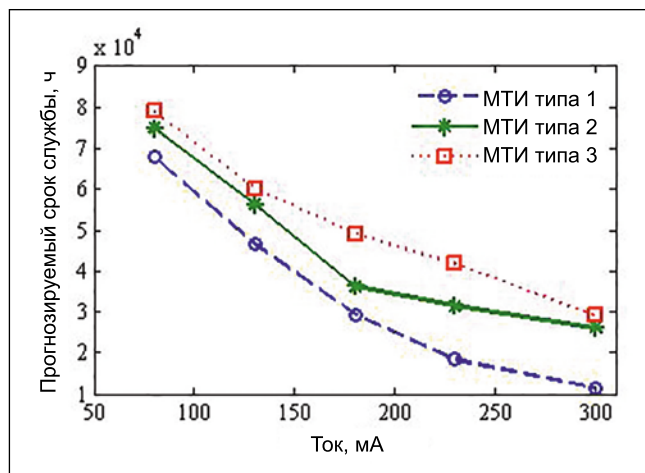


Рис. 7. Зависимость прогнозируемого срока службы от тока при использовании разных МТИ



чти 72 °C) наблюдалось в случае СДМ с МТИ типа 1 при равном 300 мА значении питающего тока. В случае МТИ типа 3 температура p - n -перехода была ниже, чем при использовании МТИ других типов, и при токе 300 мА она оказалась равной 53,83 °C.

Так что можно сделать вывод, что передача тепла от p - n -перехода к радиатору или окружающему воздуху зависит от теплопроводности МТИ и прочих материалов. В данном случае теплопроводность МТИ типа 3 выше, чем у МТИ остальных двух типов.

Температура p - n -перехода СДМ меняется при изменении толщины слоя МТИ. Это видно на рис. 6, где увеличение толщины МТИ приводит к увеличению температуры p - n -перехода, причём при большей толщине МТИ зависимость температуры p - n -перехода от тока оказывается более крутой, чем при меньшей толщине МТИ,

и при токе 300 мА температура p - n -перехода оказалась равной 67,33 °C в случае МТИ типа 2 и 69,11 °C в случае МТИ типа 3.

Так что температура p - n -перехода СДМ возрастает не только при увеличении питающего тока, но и при увеличении толщины слоя МТИ.

Для производителей СД очень большое значение имеет прогнозирование сроков службы. В данной работе для прогнозирования срока службы СДМ используется экспоненциальная функция [26]:

$$L = A_{T_j} \times e^{(-n \times T_j)}, \quad (6)$$

где $A_{T_j} = 477337^3$, $n = 0,052$, а T_j – температура p - n -перехода рассматриваемого СДМ [26]⁴. Рассчитанные при помощи уравнения (6) зависимость сроков службы СДМ от питающего тока приведены на рис. 7, из которо-

го следует, что срок службы СДМ тем больше, чем меньше его ток. В данном случае срок службы СДМ с МТИ типа 3 оказался наибольшим при всех значениях питающего тока.

Аналогичным образом, для СДМ с имеющими разную толщину МТИ типов 2 и 3 были рассчитаны зависимости прогнозируемых сроков службы от питающего тока (рис. 8). Как показано на рис. 8, при увеличении толщины слоя МТИ срок службы СДМ уменьшается. При увеличении толщины слоя МТИ имеет место уменьшение отвода тепла, в результате чего возрастает температура p - n -перехода. Так что толщина слоя МТИ имеет большое значение для разработчиков и производителей СДМ.

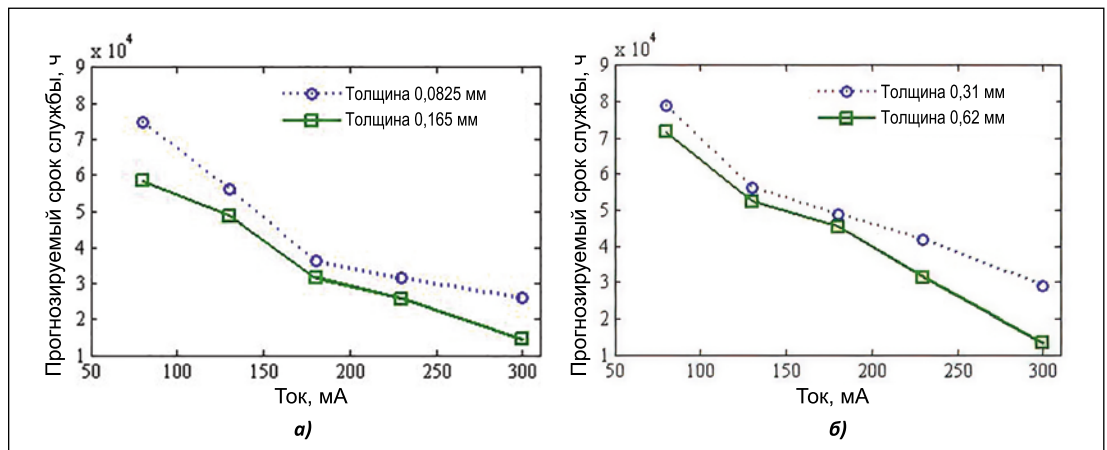
5. Заключение

Оптические и тепловые характеристики СДМ двух упомянутых типов с имеющими разные теплопроводности МТИ трёх типов были измерены в лабораторных условиях при одних и тех же значениях входных токов и мощности. В работе проведено сравнение уровней отвода тепла от СДМ с МТИ трёх типов, и результаты измерений показали, что термопрокладка обеспечивает лучшие по сравнению с двумя другими МТИ рассеяние тепла и световой поток. Установлена связь между температурой поверхности радиатора и временем работы СДМ, а также между температурой p - n -перехода и температурой радиатора СДМ. Правильный выбор теплового режима компонентов СДМ позволяет улучшить надёжность СДМ. Результаты проведённых исследований показали, что, несмотря на технический прогресс, управление тепловым режимом всё ещё остаётся

³ См. примечание 2. – Прим. пер.

⁴ 1) В статье не указаны единицы измерения параметров L и T_j , и при этом авторы настаивают на том, что постоянные A_{T_j} и n – безразмерные. 2) Если считать, что A_{T_j} и n измеряются, соответственно, в часах и 1/°C, и подставить в формулу (6) вполне приемлемую для СД температуру p - n -перехода, равную 80 °C, то получаем срок службы 7450 ч, что несколько маловато. – Прим. пер.

Рис. 8. Зависимость прогнозируемого срока службы от тока при разной толщине МТИ типов 2 (а) и 3 (б)



важным элементом разработки светодиодных ламп с СД.

Термомеханическая модель имеющих в продаже CoB СДМ с МТИ трёх типов и разными питающими токами сформирована с использованием метода конечных элементов. Для CoB СДМ с МТИ трёх типов проведены сравнение и анализ зависимости температуры p - n -перехода от питающего тока. Наименьшее значение температуры p - n -перехода наблюдалось в случае МТИ типа 3, что обусловлено его более высокой теплопроводностью и, соответственно, обеспечиваемым им лучшим отводом тепла к радиатору. Установлено, что температура p - n -перехода увеличивается при увеличении как питающего тока, так и толщины МТИ, что приводит к уменьшению срока службы СДМ. Данную работу можно рассматривать как пример исследований, облегчающих моделирование тепловых процессов при разработке CoB СДМ. Производителям СДМ следует помнить, что температура p - n -перехода СД лампы возрастает при увеличении не только питающего тока, но и толщины слоя МТИ.

Первый автор хотел бы поблагодарить правительство Западной Бенгалии, Индия, за предоставление стипендии. Оба автора хотели бы поблагодарить светотехническую школу факультета технического проектирования и электротехники Джадавпурского университета, Колката, Индия, за оказанную поддержку и предоставление экспериментальной установки для завершения данной работы в лабораторных условиях.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Narendran, N., Maliyagoda, N., Bierman, A., Pysar, R., Overington, M. Characterizing White LEDs for General Illumination Applications // SPIE Photonics West Conference, Jan, 2000, San Jose, CA. – P. 3938–3939.
- Arika, M., Beckerb, C., Weaverb, S., Petroskic, J. Thermal Management of LEDs: Package to System // 3rd Int. Conf. on Solid State Lighting, SPIE. Vol. 5187, doi: 10.1117/12.512731(2004)
- Lu, G., Hao, M., Lai, C., Yao, B. Thermal analysis and reliability evaluation on high power Flip chip LED // IEEE conf., China, 2015. ISBN: 978–1–5090–0175–0.
- Kang, J.-M., Kim, J.-W., Choi, J.-H., Kim, D.-H., Kwon, H.-K. Lifetime estimation of high-power blue light-emitting diode chips // Microelectron. Reliab. – 2009. – Vol. 49. – P. 1231–1235.
- Meneghini, M., Tazzoli, A., Mura, G., Meneghesso, G., Zanoni, E. A review on the physical mechanisms that limit the reliability of GaN-based LEDs // IEEE Trans. Electron Devices. – 2010. – Vol. 57. – P. 108–118.
- Elger, G., Hanss, A., Schmid, M., Wipiejewski, T. Application of thermal analysis for the development of reliable high power LED modules // Solid State Lighting (SSLCHINA), 2014, 11th China International Forum, ISBN-978–1–4799–6696–7, pp: 158–164, 2014.
- Song, B.-M., Han, B., Lee, J.-H. Optimum design domain of LEDbased solid state lighting considering cost, energy consumption and reliability // Microelectron. Reliab. – 2013. – Vol. 53. – P. 435–442.
- Krames, M. R., Shchekin, O. B., Mueller-Mach, R., Mueller, G. O., Zhou, L., Harbers, G., Craford, M.G. Status and Future of High-Power Light Emitting Diodes for Solid-State Lighting // J. Display Technol. – 2007. – Vol. 3, No. 2. – P. 160–175.
- Lock, D.A., Hall, S. R.G., Prins, A.D., Crutchley, B.G., Kynaston, S., Sweeney, S.J. LED Junction Temperature Measurement Using Generated Photocurrent // Journal of Display Technology. – 2013. – Vol. 9, No. 5. – P. 396–401.
- Chen, Q., Luo, X., Zhou, S., Liu, S. Dynamic junction temperature measurement for high power light emitting diodes // American Institute of Physics, Review of Scientific Instruments. – 2011. – Vol. 82. – P. 084904.
- Lee, C.-Y., Ay Su, Liu, Y.-C., Fan, W.-Y., Hsieh, W.-J. In Situ Measurement of the Junction Temperature of Light Emitting Diodes Using a Flexible Micro Temperature Sensor // Sensors. – 2009. – Vol. 9, No. 7. – P. 5068–5075; ISSN1424–8220.
- Ha, M., Graham, S. Development of a thermal resistance model for chip-on-board packaging of high power LED arrays // Microelectronics Reliability. – 2012. – Vol. 52. – P. 836–844.
- Chernyakov, A.E., et al. Theoretical and Experimental Study of Thermal Management in High-Power AlInGaN LEDs // IEEE Conf. (EuroSimE2014), 978–1–4799–4790–4/14.
- Kai Han, K., Liu, M., Fan, S., Shen, H. Improved Electrical Measurement Method for Junction Temperature of Light Emitting Diodes // PRZEGLĄD ELEKTROTECHNICZNY (Electrical Review), ISSN0033–2097, R. 88 NR3b/2012.
- Christensen, A., Graham, S. Thermal effects in packaging high power light emitting diode arrays // Applied Thermal Engineering. – 2009. – Vol. 29. – P. 364–371. doi:10.1016/j.applthermaleng.2008.03.019.
- Keppens, A., Ryckaert, W.R., Deconinck, G., Hanselaer, P. High power light-emitting diode junction temperature determination from current-voltage characteristics // Journal of Applied Physics. – 2008. – Vol. 104, No. 9. – P. 093104–93104–8.
- Freisleben, J., Dzugan, T., Hamacek, A. Comparative Study of Printed Circuit Board Substrates used for Thermal Management of High Power LEDs // IEEE38th Int. Spring Seminar on Electronics Technology, 978–1–4799–8860–0, 2015.
- Mitterhuber, L., et al. Investigation of the Temperature-Dependent Heat Path of an

LED Module by Thermal Simulation and Design of Experiments // IEEE Thermic 2016–22nd Int. Workshop, ISBN978–1–5090–5450–3, 2016.

19. Guoguang, L., Shaohua, Y., Zhifeng, L. Failure analysis of LEDs // IEEE2011 Int. Symp. on Advanced Packaging Materials (APM 2011), 978–1–4673–0149–7/11, 2011.

20. Hsu, Y.C., et al. Failure Mechanisms Associated with Lens Shape of High-Power LED Modules in Aging Test // IEEE LEOS2007, P. 1092–8081.

21. Ghosh, K, Raul, D. Performance analysis of various types of high power light emitting diodes // Light and Engineering. – 2018. – Vol. 26, No. 1. – P. 91–98. doi.org/10.33383/2017–045.

22. Гхон К., Раул Д. Анализ эксплуатационных характеристик разнотипных светодиодных модулей // Светотехника. – 2017. – № 6. – С. 56–61.

23. Raul, D., Ghosh, K. Performance of chip-on-board and surface-mounted high-power LED luminaires at different relative humidities and temperatures // Lighting Research & Technology, doi: 10.1177/1477153518819040, 2018.

24. 25. Integrated Circuits Thermal Test Method Environmental Conditions – JEDEC Solid State Technology Association – JESD51–2A, January 2008.

26. Wang, F.-K., Chu, T.-P. Lifetime predictions of LED-based light bars by accelerated degradation test // Microelectron Reliability. – 2012. – Vol. 52, No. 7. – P. 1332–1336.

28–29 июля 2020 года прошёл семинар МКО, посвящённый двум актуальным темам – «Колориметрия МКО и 3-D печать» и «Измерения продвинутого уровня двунаправленной функции распределения коэффициента отражения, а также блеска и зернистости». В рамках вебинара были представлены учебные пособия и проведены обсуждения внесённых изменений.

Новое учебное пособие «МКО 015:2018 Колориметрия. 4-е издание» было опубликовано в 2018 году. Необходимость проведения исследований и выпуска новых уточняющих рекомендаций в этой области были связаны с эволюцией ИС, измерительных приборов, методов моделирования и оценки качества цвета. Например, доказано, что при оценке цвета от типовых СД ИС белого света с помощью стандартного колориметрического наблюдателя МКО 1931 возникают существенные ошибки в текущей цветовой спецификации. Решение усовершенствовать колориметрическую систему МКО 1931, взяв за основу фундаментальную колбочковую теорию колориметрии МКО 2015, позволило установить связь между колориметрией и физиологией и улучшить понимание цвета. Основываясь на современных знаниях о цветовой визуальной системе человека, МКО опубликовала набор новых функций подбора цветов, учитывающих возраст наблюдателя и размер поля стимула, а также предложила метод получения соответствующей диаграммы цветности.

Другой проблемой повсеместного использования СД ИС стало разнообразие в спектрах света, что привело к новым вопросам по оценке качества цвета. В 2017 г. МКО был разработан новый индекс точности цветопередачи (CFI) для будущего обновления индекса цветопередачи МКО CRI. Однако, одного CFI или CRI недостаточно для оценки общего качества цвета ИС, результаты таких оценок часто не согласуются с восприятием цветопередачи конечными пользователями. На основе проведённых в последнее время исследований МКО планирует определить стандартные индексы, которые могут быть использованы с индексом точности цветопередачи и которые позволят определить или оценить общее цветовое качество светотехнической продукции.

Учебник МКО по основам визуального внешнего вида и измерению включа-

ет в себя разделы о визуальном восприятии материалов, основы радиометрии, колориметрии, основы двунаправленной функции распределения отражения, блеск, полихроматизм, гладкость и зернистость (*sparkle and graininess*). Внешний вид является одним из наиболее важных параметров, влияющих на выбор и потребности клиентов в продуктах; поэтому он должен поддаваться количественной оценке для обеспечения однородности и воспроизводимости. Существует ряд современных материалов, для корректного описания которых необходимо проводить большое количество измерений под разными углами объекта. При этом традиционные колориметрические параметры, рекомендуемые МКО не способны предсказать абсолютный внешний вид окрашенного образца в различных условиях. Решение этой проблемы описано в документе МКО 175:2006 о визуальном измерении параметров внешнего вида объекта, включая блеск, текстуру, уровень белого и гониометрические методы.

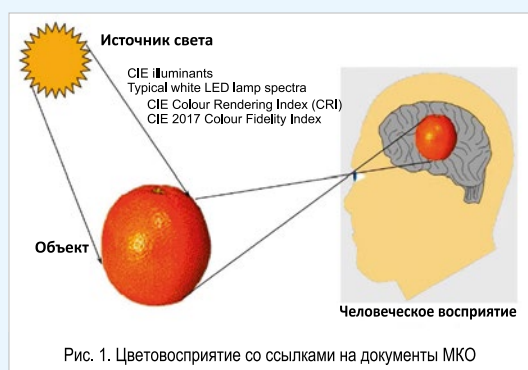


Рис. 1. Цветовосприятие со ссылками на документы МКО

Так, например, в процессе 3D-печати используются не только полимеры, но и металлы, биологические ткани, а в будущем, возможно, будет использоваться и их комбинация. Взаимосвязь между желаемыми 3D-объектами в процессе проектирования и полученными 3D-объектами должна быть визуальна и количественно оценена. При этом до настоящего момента не существует метрологии неоднородных 3D-объектов, включая 3D-форму, локальную шероховатость, текстуру и другие свойства, влияющие на визуальный эффект. Поэтому МКО поставила цель разработки идеи для измерительных приборов и их реализации в этой области, а также определения набора метрологических параметров, которые будут однозначно описывать цвет, текстуру и строение объекта применительно к его 3D-форме и созданию простой или комплексной модели поверхности, включающей физические и визуальные характеристики.



Дебашис Раул (Debashis Raul),
М.Е. Приглашённый преподаватель и старший научный сотрудник светотехнической школы факультета технического проектирования и электротехники Джадавпурского университета



Камалика Гхон (Kamalika Ghosh),
Ph.D. Доцент светотехнической школы факультета технического проектирования и электротехники Джадавпурского университета. Пожизненный член

Института инженеров, Индия, и Индийского общества инженеров-светотехников. Автор около 56 статей

ПАМЯТИ Е.И. РОЗОВСКОГО (09.09.1947 - 26.06.2020)

26 июня 2020 года на семьдесят третьем году жизни скоропостижно скончался от тяжёлого заболевания коронавирусом ведущий научный сотрудник ВНИСИ, старший научный редактор журнала «Светотехника» Евгений Исаакович Розовский – человек блестящего ума и самоотверженный труженик.

Евгений Исаакович родился в 1947 г. в Москве. После окончания средней школы в 1965 г. поступил в Московский энергетический институт (МЭИ) на факультет электронной техники, кафедру «Светотехника и источники света». Учился блестяще: два года был Ленинским стипендиатом, а в 1971 г. окончил институт с отличием.

Сразу после окончания МЭИ Евгений Исаакович был принят во Всесоюзный научно-исследовательский светотехнический институт (ВНИСИ) в качестве младшего научного сотрудника в отдел газоразрядных ламп высокого давления. С первых месяцев работы Е.И. Розовский продемонстрировал склонность к расчётно-теоретическим исследованиям. Решив совершенствоваться в области математики, он поступил на вечернее отделение Московского института электронного машиностроения (МИЭМ), где к 1975 г. получил второе высшее образование по специальности «Прикладная математика».

Окончив заочную аспирантуру ВНИСИ, в 1983 году Е.И. Розовский защитил диссертацию на соискание учёной степени кандидата технических наук на тему «Исследование прикладных процессов в дугowych источниках света и разработка методики расчёта конструктивных параметров катодов ксеноновых ламп сверхвысокого диапазона».

Научная карьера Евгения Исааковича неразрывно связана с ВНИСИ, в котором он проработал всю жизнь, пройдя путь от инженера и младшего научного сотрудника до ведущего научного со-



трудника института. Е.И. Розовский был одним из первых во ВНИСИ специалистов, самостоятельно освоивших разработку программ на ЭВМ, занимаясь теоретико-экспериментальными исследованиями ртутных, металло-галогенных и ксеноновых ламп. Это помогло ему в дальнейшем успешно решать задачи расчёта фотохимических облучательных установок с плоскими и объёмными приёмниками излучения.

В непростые для науки 90-е годы Евгению Исааковичу пришлось всё больше заниматься вопросами технологии производства специальных газоразрядных источников излучения в небольшом ламповом цехе ВНИСИ. В 2001 году он возглавил это производство, которое несколько лет конкурировало, в основном, с источниками технологического назначения известных зарубежных фирм.

В 2006 г., когда производство ламп во ВНИСИ было остановлено, Е.И. Розовский продолжил работу в институте в качестве ведущего научного сотрудника с самым широким кругом светотехнических задач. Будучи талантливым учёным и высококвалифицированным специалистом, Евгений Исаакович играл ключевую роль во многих значимых для института работах. Среди последних из них – разработка серии

стандартов по светодиодному освещению, в том числе для сельского хозяйства и музейного освещения, разработка светотехнических приложений к ТР ТС «Требования и характеристики энергетической эффективности, правила определения этих характеристик и формы подтверждения соответствия требованиям к энергетической эффективности источников света», научно-исследовательские работы в областях светокультуры растений и освещения музеев.

Важно отметить серьёзный вклад Е.И. Розовского в работу Российского национального комитета МКО и экспертную деятельность в проектах Международной электротехнической комиссии. На счету Е.И. Розовского более 60 публикаций в российских и зарубежных научных изданиях.

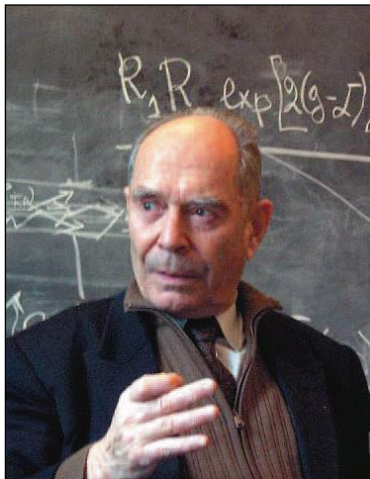
Долгое время трудился Е.И. Розовский и в журнале «Светотехника» в качестве старшего научного редактора и редактора-переводчика. Его умение работать с текстом, глубокие знания в области светотехники и светотехнической терминологии, прекрасное знание английского языка сделали возможными издание многих зарубежных научных статей и публикаций на русском языке.

Евгений Исаакович прожил яркую творческую жизнь, пользовался большим уважением своих коллег, состоялся как известный в стране светотехник. Коллектив ВНИСИ и редакция журнала «Светотехника» потеряли поистине незаменимого сотрудника, исследователя, товарища. Скромность, доброжелательность и интеллигентность Е.И. Розовского, его кругозор и эрудиция, распространяющиеся куда шире профессиональных знаний, трепетное и уважительное отношение к близким и к коллегам навсегда останутся в нашей памяти.

**Коллектив ВНИСИ
им. С.И. Вавилова, сотрудники
редакции журнала «Светотехника»**

Александр Эммануилович Юнович – 90 лет

9 июня 2020 года заслуженному профессору физического факультета Московского Государственного Университета им. Ломоносова (МГУ) Александру Эммануиловичу Юновичу исполнилось 90 лет, большую часть из которых он посвятил только МГУ. Вся свою творческую жизнь А.Э. Юнович занимается исследованиями и разработками светодиодов. Будучи профессором Университета, Александр Эммануилович воспитал целую плеяду российских физиков. Наряду с этим Александр Эммануилович постоянно имел самые тесные контакты со светотехниками, прогнозировал роль и перспективы развития светодиодов для цели освещения. Так, в 2003 году он опубликовал в журнале «Све-



тотехника» принципиально важную статью «Светодиоды как основа освещения будущего», которая впервые чётко обрисовала направление и перспективы использования светодиодов для освещения.

Совместно с Ю.Б. Айзенбергом А.Э. Юнович органи-

зовали постоянно действующий форум по светодиодам на Международной выставке «Interlight» в Москве, который успешно функционировал более 15 лет.

Поздравляя Александра Эммануиловича с грандиозным юбилеем, редакция журнала, коллеги и ученики юбиляра желают ему крепкого здоровья и сил ещё многие годы передавать молодым физикам огромный багаж накопленных знаний.

Ниже мы публикуем поздравления юбиляру от его более молодого коллеги Ф.И. Маняхина и ученика А.Н. Туркина.

Редакция журнала «Светотехника», коллеги и ученики А.Э. Юновича

Нашему учителю – профессору Юновичу

9 июня 2020 года исполнилось 90 лет профессору кафедры физики полупроводников и криоэлектроники физического факультета Московского Государственного Университета им. М.В. Ломоносова, Заслуженному профессору Московского Университета Александру Эммануиловичу Юновичу – блестящему учёному, замечательному педагогу и очень интересному и хорошему человеку!

Не совру, если скажу, что вся научная и преподавательская жизнь Александра Эммануиловича связана с физическим факультетом МГУ. Его он с отличием окончил в 1953 году, поступил в аспирантуру, остался работать, защитил в 1958 году кандидатскую, а в 1989 году докторскую диссертацию. Александр Эммануилович посвятил всю свою научную и препода-

вательскую деятельность работе на одной кафедре – кафедре физики полупроводников/физики полупроводников и криоэлектроники, где читал лекции по разным курсам, руководил курсовыми и дипломными работами студентов, выполнял научное руководство аспирантами. Он подготовил большое количество специалистов в области физики полупроводников, и многие его воспитанники стали известными учёными и преподавателями, на лекции по его курсам ходили студенты других кафедр физического факультета, научная работа которых в той или иной степени была связана с освещаемой в этих курсах темой. И по своему опыту могу сказать, у Александра Эммануиловича было и есть, чему поучиться! На мой взгляд, это действительно настоящий профессор:

один из вариантов перевода этого слова с французского языка звучит как учитель. Своим учителем считают А.Э. Юновича многие выпускники физического факультета, причём учителем не только в науке, в физике, но и в жизни. Александр Эммануилович – очень эрудированный человек, обладающий широчайшим кругозором и глубокими знаниями в разных областях. Будучи исключительно интеллигентным и расположенным человеком, он всегда готов поделиться своими знаниями с окружающими его людьми. Кроме того, Александр Эммануилович – замечательный рассказчик: разговаривать с ним, слушать его лекции, доклады или просто занимательные истории из жизни – одно удовольствие!

Я стал работать с Александром Эммануиловичем в аспирантуре физического факультета в начале 1996 года, когда он получил от Шуджи Накамуры (в тот момент

сотрудника японской фирмы «Ничия») несколько образцов первых серийных светодиодов на основе гетероструктур нитрида галлия и его твёрдых растворов с одиночными квантовыми ямами синего и зелёного свечения. Это были новейшие на тот момент источники излучения – первые светодиоды в коротковолновой области видимого спектра, и Александр Эммануилович предвидел за ними будущее. Я помню, с каким интересом и увлечением он, уже опытный учёный, который видел многое в физике, занялся вместе с нами – студентами и аспирантами – исследованиями этих новых источников излучения!

Как искренне он радовался полученным в процессе наших исследований новым результатам, с каким интересом их анализировал, во время работы постоянно показывая нам, как вести экспериментальные исследования, как анализировать полученные результаты, как грамотно их интерпретировать.

И всё это получалось у Александра Эммануиловича очень естественно, он совмещал в ходе нашей работы научные исследования новых объектов с обучением молодого поколения. Не это ли – мастерство преподавателя?

Кроме этого, Александр Эммануилович рассказывал коллегам о наших исследованиях, приглашал их к совместным работам. В результате по данному направлению на факультете стал работать дружный коллектив сотрудников разных кафедр, объединённых одной идеей. Но мало этого, в сотрудничестве с нами работали коллеги из других вузов.

Как аспирант А.Э. Юновича, успешно защитивший под его руководством в мае 1998 года диссертацию на соискание учёной степени кандидата физико-математических наук, должен сказать, что та наша работа предопределила дальнейшее направление моих научных исследования, да и преподавательскую часть тоже. Многим вещам

я учился у Александра Эммануиловича и как научный сотрудник, и как преподаватель – как представлять результаты исследований, как докладывать их, как читать студентам лекции, как рассказывать студентам физические основы того или иного курса... И должен сказать, что и сейчас, уже будучи доцентом физического факультета МГУ, я продолжаю у него учиться и стараюсь советоваться с ним по разным вопросам.

Поздравляя Вас, Александр Эммануилович, с таким выдающимся юбилеем, я от всей души хочу сказать Вам спасибо за всё, что Вы давали и продолжаете давать Вашим ученикам! Рискну предположить, что к моим словам готовы присоединиться все без исключения люди, которые в разное время были Вашими студентами, аспирантами или молодыми коллегами.

А.Н. Туркин,
кандидат физ.-мат. наук

О российском учёном (к 90-летию А.Э. Юновича)

Современные великие учёные – это истинные поэты.

Р. Роллан

В научном мышлении всегда присутствует элемент поэзии. Настоящая наука и настоящая музыка требуют однородного мыслительного процесса.

А. Эйнштейн

Познавать, открывать, опубликовывать – вот судьба учёного.

Л. Арагон

Эти эпиграфы точно характеризуют замечательного человека, учёного с мировым именем, педагога – А.Э. Юновича. Он как многогранный кристалл завораживает своим многообразием знаний, способностей, увлечений... Но в жизни он выбрал науку, и посвятил ей весь свой трудовой путь.

Если существует переселение душ, то его многогранный талант будет жить долго.

Александр Эммануилович – интереснейший собеседник, который в компании может слегка побалагурить, любит музыку, театр, литературу, обладает энциклопедическими знаниями. Но это как бы

«для себя». Самое замечательное его качество – он любит людей: и тех, кто занимается наукой, и тех, кто любит искусство...

Как говорят: «Скажи, кто твой друг, я скажу, кто ты». Его окружают замечательные люди с разнообразными интересами. Большую часть своей души и знаний он отдаёт младшим коллегам – студентам и аспирантам. Трудно даже назвать цифру воспитанных им учёных.

К ним я отношу и себя. Моё знакомство с Александром Эммануиловичем датируется 1985 г. До этого я был знаком с его работами, цитировал их. Но самое тесное

сотрудничество с ним и его воспитанниками началось в 1996 г., когда Александр Эммануилович получил от С. Накамуры несколько первых серийных светодиодов с квантовыми ямами синего и зелёного свечения. А.Э. Юнович предвидел будущее этих светодиодов. Им был проведён анализ публикаций по этой теме, который показал перспективность развития в данном направлении. Он интенсивно включился сам со своим коллективом и привлёк нас, сотрудников МИСиС – Н.А. Ковалёва, А.Б. Ваттану и меня – к экспериментальным исследованиям, участиям в международных конференциях и публикациях.

С первых лет создания современных светодиодов с квантовыми ямами Александр Эммануилович организовал совместное с ФТИ им. Иоффе Всероссийское совещание «Нитриды галлия, индия и алюминия – структуры и приборы», которое по значимости и количеству участников практически не уступало проводимым тогда конференциям *Mat. Res. Soc. Proc.*, в которых принимали участие и мы. На этом

совещании представляли свои новые разработки и японцы!

В соавторстве с Александром Эммануиловичем нами были опубликованы значимые статьи, которые и по настоящее время цитируются [1–11]. В этих статьях А.Э. Юнович впервые обнаружил у светодиодов с квантовыми ямами неравномерность зависимости внешнего квантового выхода от плотности тока, влияние на него вида легирования области расположения квантовых ям. В этих статьях впервые были представлены профили легирования области квантовых ям с разрешением по глубине до 1 нм, которые позволяют идентифицировать производителя кристаллов. Впервые им обнаружено неравномерное распределение индия в квантовых ямах и дана оценка неоднородности по анализу спектров излучения. Была обнаружена люминесценция при обратном смещении светодиодов, теоретически рассчитаны спектры и их температурная зависимость. Он был лидером в идеях. С молодым задором увлёкся новым поколением светодиодов. Многие его предсказания, например, о применении светодиодов в осветительном оборудовании и в полноцветных экранах, сбылись и ещё будут реализовываться.

Одним из замечательных талантов Александра Эммануиловича является популяризация сложных научных явлений. Им опубликовано множество научно-популярных статей по современным светодиодам, он является консультантом в различных НПО по производству светодиодов.

Можно сказать, что нерушимыми памятниками его научной работы являются книги известных учёных А. Берга, П. Дина (Берг, А., Дин П. Светодиоды. М., Мир. 1979, 668 с.), Ф. Шуберта (Шуберт, Ф. Светодиоды. М., Физматлит, 2008, 496 с.) под ред. проф. А.Э. Юновича. Благодаря его редакции книги легко читаются и имеют адекватное содержание с оригиналами.

Александр Эммануилович отличный семьянин, достойный гражданин. Его работоспособность и энергию можно сравнить с атом-

ным реактором для мирных целей. Ровный характер, 100 % КПД. Я благодарю судьбу за встречу с этим человеком, у которого я научился любить науку, относиться с уважением к тем, у кого учишься и кого учишь, доносить свои знания так, чтобы они были поняты и восприняты.

90 лет – творческий возраст. В моей родне отмечены 94, 97, 103 года в здравом уме и бодрости духа. Желаю, чтобы Александр Эммануилович с лёгкостью увеличил эту планку.

**Ф.И. Маняхин,
проф., доктор физ. наук**

ОСНОВНЫЕ СТАТЬИ А.Э. ЮНОВИЧА ПО СВЕТОДИОДАМ

1. Кудряшов В.Е., Туркин А.Н., Юнович А.Э., Ковалёв А.Н., Маняхин Ф.И. Люминесцентные и электрические свойства светодиодов InGaN/AlGaIn/GaN с множественными квантовыми ямами // ФТП. 1999. Т. 33. в. 4. с. 445–450.

2. Yunovich A.E., Kudryashov V.E., Turkin A.N., Kovalev A.N., Manyakhin F.I. Electroluminescence Properties of InGaN/AlGaIn/GaN Light Emitting Diodes With Multiple Quantum Wells. // MRS Internet J. Nitride Semicond. Res. 4S1, G6.29 (1999)

3. Юнович А.Э., Кудряшов В.Е., Мамакин С.С., Туркин А.Н., Ковалёв А.Н., Маняхин Ф.И. Спектры и квантовый выход излучения светодиодов с квантовыми ямами на основе гетероструктур из Ga N. // Тезисы докладов 3-го Всероссийского совещания «Нитриды галлия, индия и алюминия – структуры и приборы», 2 июня 1999 г., МГУ, Москва. С. 62–64.

4. Юнович А.Э., Кудряшов В.Е., Мамакин С.С., Туркин А.Н., Ковалёв А.Н., Маняхин Ф.И. Механизмы рекомбинации и квантовый выход излучения светодиодов на основе 2D-гетероструктур из нитрида галлия // IV Росс. конф. по физике полупроводников, тез. докладов. Окт. 1999, Новосибирск, С. 324.

5. Manyakhin F. et al. Spectra and quantum efficiency of light emitting diodes based on GaN-heterostructures with quantum wells // Physica Status Solidi (a). 1999, Vol. 176. № 1. P. 783–786.

6. Kudryashov V.E., Mamakin S.S., Turkin A.N., Yunovich A.E., Kovalev A.N., Manyakhin F.I. Dependence of aging on the inhomogenities in InGaN/AlGaIn/GaN

light-emitting diodes.// MRS symposium proceedings V 595, W11.25–30543 (2000)

7. Kudryashov V.E., Mamakin S.S., Turkin A.N., Yunovich A.E., Kovalev A.N., Manyakhin F.I. Dependence of aging on the inhomogenities in InGaN/AlGaIn/GaN light-emitting diodes // MRS Intern. Journ. of Nitride Semic. Res., 5s1, W11.25 (2000). <http://nrs.mij.mrs.org/5S1/W11.25>

8. Manyakhin F.I., Kovalev A.N., Kudryashov V.E., Mamakin S.S., Yunovich A.E. «Change of charge centers distribution in AlGaIn/InGaIn/GaN heterostructures with multiple quantum wells during LED's aging at high currents» // The Fourth European GaN Workshop, Nottingham 2000, abstract 2D.

9. Кудряшов В.Е., Мамакин С.С., Туркин А.Н., Юнович А.Э., Ковалёв А.Н., Маняхин Ф.И. Спектры и квантовый выход излучения светодиодов с квантовыми ямами на основе гетероструктур из GaN – зависимость от тока и напряжения.// ФТП. 2001, 35(7), С. 861–868.

10. Маняхин Ф.И., Ватмана А.Б., Рыжиков И.В., Абрамов В.С. Влияние внешних факторов на избыточные (безызлучательные) токи в светодиодах с гетероструктурами, Тезисы Всероссийской конференции «Нитриды галлия, индия и алюминия – структуры и приборы», Москва, 01–02 ноября 2001 г. В журнале «Светодиоды и лазеры», октябрь 2001 г., № 1, С. 22.

11. Маняхин Ф.И., Ватмана А.Б., Юнович А.Э., Мамакин С.С. Электрические свойства и спектры люминесценции светодиодов на основе модулированно легированных гетероструктур с квантовыми ямами типа InGaIn/GaN. // Тезисы Всероссийской конференции «Нитриды галлия, индия и алюминия – структуры и приборы», Москва, 01–02 ноября 2001 г. В журнале «Светодиоды и лазеры», октябрь 2001 г., № 1, С. 21.

12. Маняхин Ф.И., Ватмана А.Б., Рыжиков И.В., Рыжиков А.И., Абрамов В.С. Влияние внешних факторов на избыточные (безызлучательные) токи в светодиодах с гетероструктурами // Труды международной научно-технической конференции «Моделирование техпроцессов», в сб. «Моделирование и исследование сложных систем», Москва, 2001.

13. Yunovich A.E., Mamakin S.S., Manyakhin F.I., Vattana A.B. and et. all. Electrical properties and luminescence spectra of light-emitting diodes with InGaIn/GaN quantum wells // MRS2002. Spring Meeting. San Francisco Marriott and Argent Hotels. Abstracts. K2.4. P. 195.

Журналу «Электричество» – 140 лет

Редакция журнала «Светотехника» поздравляет старейший русский научно-технический журнал «Электричество» с юбилеем. Журнал был основан в 1880 году по инициативе выдающихся российских учёных-электротехников П.Н. Яблочкова, В.Н. Чиколева, Д.А. Лачинова и А.Н. Лодыгина, объединённых в VI (электротехническом) отделе Императорского русского технического общества. Все публикации по светотехнике в России выходили в этом журнале до 1932 года. Публикуем¹ статью главного редактора журнала «Электричество» П.А. Бутырина, в которой кратко рассматриваются четыре исторические этапа издания журнала, первый номер которого вышел в июле 1880 г. Первый этап охватывает период с начала издания «Электричества» до революции 1917 г.; второй – с 1922 г. (после возобновления издания) до начала Великой Отечественной войны; третий – послевоенный период в доперестроечное время (1944–1984 гг.) и последний четвёртый этап – с 1985 г. по настоящее время. 140-летняя история журнала рассматривается в контексте социокультурных реальностей каждого этапа, отражающихся на публикуемых материалах.

Журнал «Электричество» – старейшее периодическое научное издание России в области электротехники. Первый номер журнала вышел в свет в июле 1880 г. «Его начало было результатом энергии той же группы живых, талантливых и знающих людей, которые учредили VI (электротехнический) отдел Императорского Русского Технического Общества и устроили I Электротехническую выставку, во главе группы были П.Н. Яблочков, В.Н. Чиколев, Д.А. Лачинов, В.А. Воскресенский и первый председатель VI отдела Ф.К. Величко» [1]. Предложение об издании в России отдельного журнала по электротехнике было зачитано В.Н. Чиколевым 6 февраля 1880 г. на собрании VI отдела ИРТО, а 7 мая 1880 г. было принято решение отдела об издании такого журнала под названием «Электричество» с возложением на В.Н. Чиколева обязанностей редактора-издателя. В первом номере журнала от редакции заявлялось: «Преследуя главную цель Императорского Русского Технического Общества – содействовать развитию техники и технической промышленности России, журнал «Электричество», издаваемый VI отделом Общества, поставил себе задачей: разработку различных вопросов, относящихся до электротехники, и распространение среди читающей публики необходимых и крайне интересных в настоящее время сведений как по теории электричества, так и по применению его в науке и обще-

житии. По своему могуществу и необыкновенному разнообразию явлений, а равно и по тем неисчислимым услугам, которые электричество уже теперь оказывает человеку, эта, можно сказать, ещё юная физическая сила, в очень непродолжительном времени, должна получить всеобщее применение и, по всей вероятности, займёт первое место среди прочих сил природы, данным к услугам человечества». Далее отмечалось: «В России нет отдельного органа по этому предмету, и сведения о новейших отраслях по электричеству интересующиеся ими специалисты должны почерпать из иностранных или весьма немногих наших технических журналов...».

«Журнал «Электричество» постарается восполнить означенный пробел в нашей литературе и стать в один ряд со своими западными предшественниками: *The Electricite*, *The Telegraphic Journal*, *L'Electricite*, *Lamiere Electrique*, *Elektrotechnische Zeitschrift* и т.д., которые уже пользуются всеобщим вниманием.

Журнал наш предназначается служить открытою трибуною для всех, которые своими трудами принимают участие в успехах электричества и применениях его в искусствах, промышленности и общежитии; популяризовать начала, на которых основываются все применения электричества; распространять сведения о его успехах и заслугах сообщать все новейшие изобретения в этой области, у нас и за границей, по мере их появления; следить за электрической литературой и давать отчёты о важнейших сочинениях; облегчать по возможности труд и справки специалистам и дру-

зьям науки полезными библиографическими и техническими указаниями. Вот задача, исполнение которой приняла на себя редакция предлагаемого журнала» [2].

Журнал в 1880–1917 гг. Редакционная политика осуществляется в полном соответствии с задачей, поставленной в первом его номере. В первую очередь, журнал как орган VI отдела ИРТО, в то время интеллектуального центра электротехники России, подробно и оперативно освещает все важнейшие события, происходящие в этом отделе, и его решения по насущным проблемам электротехнической жизни, а также информирует читателей о важных событиях мировой электротехники – всемирных электротехнических конгрессах и международных электротехнических выставках. Даёт информацию о выдающихся технических достижениях в области электрификации, электротехники, электрофизики, электротехнологии, а также о наиболее значимых результатах в области теории электричества и его применения.

Информирует о достижениях мировой электротехники за какой-либо последний период. Так, статья в № 1, 1892 г. с описанием достижений электротехники в 1891 г. – году пуска трёхфазной электропередачи на Международной Франкфуртской электротехнической выставке – сообщает: «... Минувший год навсегда останется памятным в истории электротехники...», а в начале статьи в № 1, 1895 г. о достижениях в электротехнике в 1894 г. говорится: «...только что окончившийся год не ознаменовался никакими выдающимися открытиями и изобретениями в области электротехники, хотя...». Однако даются и менее категоричные, но более аналитичные



Рис. 1. В.М. Чиколев (1845–1898)

¹ Материал впервые опубликован в журнале «Электричество» (№ 7 за 2020 г.). Список литературы депонирован в редакции журнала «Светотехника»

обзоры достижений за большие периоды [3].

Значительное внимание журнал уделяет истории учения об электричестве, публикует информацию о современных библиографических изданиях того времени по электротехнике, материалы о крупнейших учёных в этой области, о гуманитарной составляющей развития электротехники, в частности о её влиянии на жизнь общества, приводит справочный материал по разным нормативным данным, в том числе по физическим единицам, печатает лекции по актуальным вопросам электричества, даже задачи по электротехнике. Но уже в конце XIX в. журнал выходит на тот же высокий уровень, что и его лучшие зарубежные аналоги.

Для российской аудитории журнал стал университетом, энциклопедией и центром развития электротехнической науки. Этому способствовали:

- грамотное руководство и всемерная поддержка журнала со стороны VI (электротехнического) отдела ИРТО – центра электротехнической мысли России того времени;

- контакт редколлегии с читательской аудиторией и соответствие содержания журнала её запросам. В № 1, 1907 г. содержится следующее обращение: «...Редакция надеется в русских электротехниках видеть не только своих читателей, но и сотрудников. Лишь при непрерывной связи с ними, непрерывной помощи с их стороны в виде сообщений о новых потребностях русской жизни, ввиду указаний на замеченные недочёты и желательные изменения, редакция будет в состоянии выполнить свою нелёгкую задачу»;

- привлечение в качестве авторов статей крупнейших отечественных учёных, многие из которых

- стали впоследствии членами Академии наук СССР [4];

- патриотизм редакционной политики в отстаивании приоритета достижений русских учёных и трепетное отношение к состоянию электротехники страны как локомотива её развития. Так, редакционный комитет журнала в № 1, 1907 г. в обращении к читателям отмечает: «Электротехника на западе проникла во все области хозяйства, в России же мы встречаем лишь единичные случаи применения электротехники в тех областях, которые ею широко охвачены в других странах».

Среди важнейших прикладных тем журнала – мировой опыт в области электрического освещения, электрификации (в частности, конкуренции систем постоянного и переменного тока), использования одно- и трёхфазных систем, создания трёхфазных электропередач [5] и дальних электропередач, различных электромеханических устройств и аппаратов, применения электротехники в военных и медицинских целях.

Большое внимание уделяется проблеме технического образования [5, 6], причём поражает глубина её анализа, особенно перед началом Первой мировой войны. Так, в статье проф. М.А. Шателена [7], основанной на работах студенческой организации «Кружок электриков» С.-Петербургского политехнического института, даётся подробный анализ качества полученных выпускниками института научно-технических знаний с отдельной оценкой их полезности теоретических и лабораторных курсов, языковых знаний (половина студентов владели 2–4 иностранными языками, более 75 % выпускников читали наряду с русскими и иностранные научно-технические журналы). В статьях анализировались потребности рынка труда в выпускниках, уровни их оплаты, проблемы социализации и т.д. Становится ясным, как Россия подготавливала своё будущее, заботясь о кадрах в самой прогрессивной области хозяйствования. И именно эти кадры впоследствии внесли решающий вклад в её развитие, участвуя в реализации плана ГОЭЛРО, создании Единой энергетической сети и электрификации промышленности.

С началом Первой мировой войны в журнале акцентируется внимание на слабом развитии электротехнической промышленности в России. Отмечает-

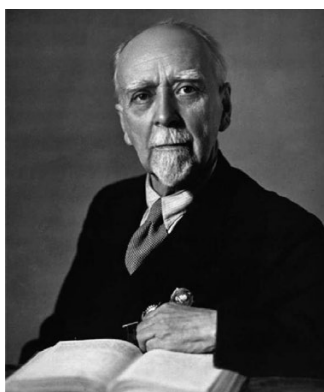


Рис. 2. Г.М. Кржижановский (1872–1959)

ся, что с 1904 по 1913 гг. импорт изделий этой промышленности возрос с 1,5 до 9,6 млн рублей и осуществлялся в основном из Германии [8]. Общая же оценка подавалась в пессимистических красках: «К сожалению, ни одна страна не работала до войны так нерационально, дорого, расточительно и непроизводительно, как Россия, а из различных отраслей промышленности этими отрицательными свойствами... в особенно большой степени обладала русская электротехническая промышленность» [9]. Негативная оценка электротехники того времени в России не ослабила интереса к крупным проектам электрификации, в частности транспорта и в том числе связи московских железных дорог с метрополитеном [10]. Необходимость же централизованной электрификации как предпосылки дальнейшего развития России весьма убедительно обосновывается в двух статьях инженера П. Гуревича, опубликованных в самом начале 1917 г. В них отмечается: «Единое рациональное решение вопроса заключается в выработке единообразного плана электрификации России с монополизацией производства в руках государства при широком участии губернских и уездных земств, городских самоуправлений и т.д.».

Журнал в 1922–1941 гг. Журнал не издавался в период 1918–1921 гг., его издание было возобновлено по инициативе VI отдела РТО и Главэнерго ВСНХ лишь в конце 1922 г.

Решающую роль в возобновлении издания журнала сыграли проф. М.А. Шателен и академик Г.М. Кржижановский. Последний имел большой авторитет не только в научном мире, но и у руководителей страны. Неслучайно на обложке первого номера возобновлённого журнала рукой Георгия Максимилиановича сделана надпись: *для Ленина* (копия обложки хранится в архиве журнала «Электричество»). Кроме того, необходимо был печатный орган для обсуждения научно-технических вопросов при реализации принятого два года назад плана ГОЭЛРО.

Изменение политических и экономических основ государства существенным образом изменило содержание, авторство и стилистику публикаций журнала. В обращении редакции журнала № 1, 1922 г. заявляются следующие основные направления публикаций: использование мощных естественных источников энергии,

рационализация эксплуатации существующих электростанций (путём объединения их по районам), использование сельскохозяйственной электрификации, разработка правильной тарифной политики в электроснабжении, восстановление и расширение предприятий электропромышленности, стандартизация электротехнического оборудования.

Содержание в основном определяется государственными программами зарождающейся плановой экономики и последовательно отражает выполнение планов ГОЭЛРО и первых пятилеток. В результате была преодолена отсталость в выработке электроэнергии – страна вошла в тройку мировых лидеров по этому показателю. Большое внимание в журнале уделяется проблемам электрификации городов, промышленных предприятий, сельского хозяйства, меньшее – быта. Современник отмечает: «... более или менее массовый (относительно) характер имеет выпуск по утюгам, чайникам и кастрюлям. По всем же остальным приборам выпуск совершенно мал» [11].

В 1930-х – начале 1940-х годов в журнале широко обсуждаются уже сложнейшие проблемы большой электроэнергетики – создание единой высоковольтной сети, вопросы устойчивости параллельной работы крупных систем, автоматизации их работы и т.д. [12].

XX в. называют веком электротехники. Рассматриваемый здесь период – время её самого быстрого развития, особенно для нашей страны. Всеобщий интерес к электротехнике у возникающего электротехнического социума – среды, в которой осуществляется развитие электротехники, резко повысил востребованность журнала – его тираж существенно вырос. Безусловно, новым является появление в числе авторов публикаций крупных руководителей промышленности, чьи статьи носят, как правило, казённый характер – в них описываются плановые показатели и результаты их достижения. Подобные публикации определяют больше практическую, нежели теоретическую направленность журнала. При этом меняются язык и стилистика публикаций, начиная с введения нового летоисчисления – от 1917 г. и регулярной отчётности не только к 10-, 15-, 20-летию и т.д. революции, но и другим её годовщинам [13].

Другое изменение – рассмотрение достижений электротехники сквозь призму «социалистическое–капиталистическое», даже в неуместных случаях [14]. Наконец, вездесущее возвеличивание руководителей государства, немислимое в дореволюционное время, и участие в «охоте на ведьм»: в ноябре 1930 г. в журнале появляется статья [15], в которой утверждалось «В руководящей головке советских электротехнических журналов... случился небывалый тяжёлый прорыв: часть авторитетных и старейших сотрудников... оказались не только рядовыми участниками открытого ОГПУ заговора организаторов интервенции, но и важнейшими руководителями в этой злобещей контрреволюционной работе». В приведённом списке «вредителей» – известные в то время отечественные электротехники и энергетики: проф. П.С. Осадчий, проф. А.А. Горев, инж. Д.Н. Фридман, инж. Н.Н. Васьков, инж. С.А. Кукель-Краевский, инж. М.Л. Каменецкий, проф. Н.И. Сушкин. В передовых статьях журнала в 1937 г. – постоянные призывы к бдительности.

Большая заслуга редколлегий того времени в том, что им удавалось поддерживать в целом высокий научно-технический уровень журнала.

Вместе с тем публикуется много рекламы мировых производителей электротехнических изделий, большое число рефератов статей из зарубежных журналов, редко, но появляются статьи по фундаментальным теоретическим проблемам электротехники. Это, например, статья академика В.Ф. Миткевича [17], а также дискуссионные отклики на опубликованные в журнале теоретические статьи.

К концу 1930-х годов журнал становится более разнообразным по тематике и совершённым по форме, чему способствовало вхождение в марте 1938 г. в число его учредителей Академии наук СССР. Впечатляет интеллектуальный уровень содержания № 10 журнала за 1940 г., посвящённого его 60-летию. В числе авторов статей этого номера академики В.Ф. Миткевич, В.П. Никитин, члены-корреспонденты АН СССР В.П. Вологдин, М.А. Шателен, В.К. Аркадьев. Вступительная статья [16], подводящая итоги освещения журналом достижений мировой электротехники, содержит полсотни ссылок на оригинальные публикации в журнале. В номере публикуются многочисленные письма – поздравле-

ния учёных и инженеров – читателей журнала, в одном из которых говорится: «Резкое разделение... технических журналов по трём разделам энергетической техники: электротехника, теплотехника и гидротехника оставляет недостаточно изученными теоретическими и практически целый ряд общенергетических вопросов... Поэтому я приветствую журнал «Электротехника»... как единственный у нас журнал, освещающий... общенергетические вопросы».

Первый номер журнала за 1941 г. начинается со статей, посвящённых совершенствованию высшего электротехнического образования, т.е. заботе о будущем, в которое начавшаяся вскоре война внесла суровые коррективы.

Журнал в послевоенное допостроечное время. (1944 по 1984 гг.). С середины 1941 г. по 1943 г. включительно журнал не издавался. Издание возобновилось в 1944 г. вначале в уменьшенном до 5 печ.л. объёме. Его содержание существенно отличалось от довоенного, став более разнообразным по тематике и менее казённым по стилистике. Впечатление производит самый первый (январский) номер 1944 г. Сейчас он смотрится с позиций уже победившего в войне народа – в нём почти нет статей, связанных с военной тематикой, его содержание устремлено в спокойное мирное будущее. Начинается номер с вполне традиционной статьи Г.М. Кржижановского «Ленин и электрификация», следующая статья «Подготовка энергетических кадров» – это хорошая аналитика образовательной деятельности в духе мирного времени. В номере помещена также совсем удивительная и до сих пор востребованная коротенькая заметка о лозоходстве и его применении для определения мест расположения кабелей, их обрывов, просачивания грунтовых вод; приводятся экспериментальные данные по установлению процента людей, владеющих этим даром.

В 1944–1945 гг. в журнале публикуется много статей членов АН СССР, в частности её президента В.Л. Комарова (№№ 11–12, 1944 г., №№ 3, 6, 1945 г.) и будущего президента С.И. Вавилова (№№ 4–6, 1944 г., №№ 1–2, 1945 г.), а № 6 журнала 1945 г. целиком посвящён Академии наук СССР, её работам в области технических наук и особенно – в электротехнической области.



Рис. 3. С.И. Вавилов (1891–1951)

В сентябре 1945 г. в президиуме АН СССР с участием президента АН СССР, министра электростанций СССР, министра электропромышленности СССР прошло заседание, специально посвящённое журналу «Электричество». Вопросы издания журнала были рассмотрены и в ЦК ВКП(б). В результате объём возобновлённого журнала увеличился с 5 до 12 печл. в номере, а тираж вырос с 3 до 20 тыс. экз. Значительная часть тиража стала распространяться в зарубежных странах [18]. Патронат Академии наук оказал исключительно позитивное влияние на журнал «Электричество» и опосредованно на его читательскую аудиторию.

В период с 1944 по 1955 гг. в журнале публикуются руководители академической науки, профильных министерств и вузов. Выходят материалы о достижениях зарубежной электротехнической науки и практики, публикуются рефераты книг, полноценным становится и раздел «Дискуссии». Всё это способствовало расширению круга мышления читательской аудитории, созданию здорового научного климата и этоса электротехнической науки в стране. Постепенно, начиная с 1945 г., из названий статей стал уходить политический окрас объектов, вместо их характеристики «социалистические» стала появляться более понятная привязка – «отечественные». Подробно о публикациях этого периода рассказывается в статьях [18, 19].

В период с 1956 по 1984 гг. общая направленность публикаций по электроэнергетике, электрификации, электротехническим устройствам определялась задачами очередных пятилеток. В этот период в журнале часто публикуются статьи руководителей промышленности с представлениями все новых задач. Связь между директивами руководящих органов и научными

статьями журнала подробно, с пиететом описана в [20]. Сильная зависимость развития науки и практики от директив, администрирования, политики, интеллектуального и профессионального уровня руководителей профильных министерств и партийных органов к концу этого периода стала негативно сказываться на собственном направлении этого развития. Так, актуальнейшее в XXI в. направление электроэнергетики – возобновляемые источники энергии – почти не представлено в публикациях этого периода как не отвечающее директивным указаниям.

Крупным событием рассматриваемого периода стал 100-летний юбилей нашего журнала, которому был посвящён № 7, 1980 г. С этим событием журнал поздравляли президиум Академии наук СССР в лице её президента академика А.П. Александрова, Государственный комитет СССР по науке и технике в лице его представителя академика Г.И. Марчука, коллегия Министерства энергетики и электрификации СССР в лице его министра П.С. Непорожного, коллегия Министерства электротехнической промышленности в лице его министра А.К. Антонова, министр монтажных и специальных строительных работ СССР Б.В. Бакин, министерство высшего и среднего образования в лице министра В.Е. Елютина и целый ряд других организаций. В поздравлениях отмечалась выдающаяся роль журнала в развитии электротехнической науки и практики в нашей стране.

Журнал с 1985 г. по настоящее время. Радикальная перестройка экономических, политических и социальных отношений в конце XX в. оказала заметное влияние как на работу редакции и редколлегии журнала, так и на его содержание. Экономическая перестройка закончилась для нашего журнала тем же, что и экономическая перестройка 1920-х годов (военный коммунизм, НЭП), а именно, утратой своего постоянного помещения, периодом скитания редакции вместе с ценным архивом, сменой издателей. Этот период закончился лишь в 2019 г., когда журнал получил редакционное помещение вместе с залом заседаний редколлегии в Московском энергетическом институте, ставшем издателем журнала. Социально-политическая перестройка эмансипировала коллективное сознание электротехнического социума от коммунистических догм,

одновременно умалив значение всего общественного, что обусловило два следствия.

Первое – «капитаны» электротехнической промышленности сейчас в отличие от советских времён не стремятся использовать трибуну нашего и других журналов для представления электротехнической общественности достижений, планов и насущных проблем. Эта аналитика, к сожалению, практически исчезла из содержания журнала. Второе – эволюция обсуждения монографий, учебников, статей, проектов ГОСТов в разделе «Дискуссии» журнала от избыточности в конце XX в. до исчезновения в начале века XXI. Отсутствие в журнале этого дискурса также является негативной особенностью содержания журнала наших дней.

Помимо названных негативных следствий перестройки новая социально-политическая реальность принесла журналу и положительные изменения и прежде всего в сфере международного сотрудничества. Главный электротехнический журнал России в настоящее время имеет интернациональную редколлегию, состоящую из известных специалистов России (из них 6 членов РАН), Западной Европы, США. В числе авторов известные учёные России, Азии, Европы, Северной Америки. Журнал «Электричество» публикует статьи по 10 основным научным специальностям электротехники (по классификации Высшей аттестационной комиссии), а также статьи по истории электротехники.

История – гуманитарная составляющая содержания журнала, в XXI в. обогатилась за счёт художественной [21, 22] и социологической [23] сторон, которые вносят новые краски в палитру общей картины развития электротехники. Можно ещё раз повторить, что 140-летняя история журнала – это, по сути, летопись отечественной электротехники и энергетики, а в социальном ракурсе иллюстрирует взаимосвязь развития этих отраслей с развитием общества. Главное, что жизнь журнала «Электричество» продолжается и имеет хорошую динамику и перспективы.

*П.А. Бутырин
член-корр. РАН, заведующий
кафедрой «Теоретические основы
электротехники» НИУ «МЭИ»,
главный редактор журнала
«Электричество».*

Управление светом – основа безопасности

- Экономия
- Безопасность
- Энергоэффективность



ООО «Светосервис-ТМ»
129626, Москва, 1-й Рижский
переулок, д. 6, стр.2



info@svs-tm.ru
svs-tm.ru



+7 (495) 780-75 98

**Оформить подписку, купить журнал или статью можно на сайте
журнала «Светотехника» www.l-e-journal.com
(периодичность издания 1 раз в 2 месяца)**

«Светотехника». Полугодовая подписка на 2020 г.

«Светотехника»	бумажная	1 995 руб.
«Светотехника» для физ. лиц	электронная	1 800 руб.
«Светотехника» для юр. лиц	электронная	6 000 руб.

«Светотехника». Годовая подписка на 2020 г.

«Светотехника»	бумажная	3 990 руб.
«Светотехника» для физ. лиц	электронная	3 600 руб.
«Светотехника» для юр. лиц	электронная	12 000 руб.

«Light & Engineering». Полугодовая подписка на 2020 г.

«Light & Engineering»	бумажная	80 долл. США*
«Light & Engineering» для физ. лиц	электронная	70 долл. США*
«Light & Engineering» для юр. лиц	электронная	140 долл. США*

«Light & Engineering». Годовая подписка на 2020 г.

«Light & Engineering»	бумажная	160 долл. США*
«Light & Engineering» для физ. лиц	электронная	140 долл. США*
«Light & Engineering» для юр. лиц	электронная	275 долл. США*

Стоимость журнала

«Светотехника»	бумажная	680 руб.
«Светотехника»	электронная	600 руб.
«Light & Engineering»	бумажная	40 долл. США*
«Light & Engineering»	электронная	35 долл. США*

Стоимость статьи

«Светотехника»	электронная	400 руб.
«Light & Engineering»	электронная	6 долл. США*

*Примечание: по курсу ЦБ на дату оплаты

**Купить журнал «Светотехника» для детей и их родителей можно
на сайте журнала «Светотехника» www.l-e-journal.com
(периодичность издания 3 раза в год)**

Журнал «Светотехника» для детей и их родителей

Бумажная	690 руб.
Электронная	300 руб.

ISSN 0039-7067



9 770039 706006 >

Адрес редакции: 129626, г. Москва, Проспект Мира, д. 106, офис 331
Тел. (495) 682-58-46, 682-19-04, E-mail: bulgakova@l-e-journal.com