

СВЕТО 4 · 2019

ТЕХНИКА





Международная
светотехническая
корпорация



БООС ЛАЙТИНГ ГРУПП

Преимущества выбора OPORA ENGINEERING



КАЧЕСТВО СВАРНОГО ШВА - ПРОЧНОСТЬ И ДОЛГОВЕЧНОСТЬ



**СТАЛЬ - ИСПОЛЬЗОВАНИЕ РАЗЛИЧНЫХ ТИПОВ СТАЛИ В ЗАВИСИМОСТИ
ОТ КЛИМАТИЧЕСКИХ УСЛОВИЙ**



ГАРАНТИРОВАННЫЙ СРОК СЛУЖБЫ - 25 ЛЕТ

www.opora-e.com



БОЛЬШЕ ЧЕМ СВЕТ

Новые возможности в освещении

Преимущества самого широкого в мире ассортимента инновационных светодиодных компонентов для общего освещения.

SMD, COB и CAS, малой, средней, высокой и ультра высокой мощности, белые и цветные светодиоды, различных размеров и классов цветопередачи — выбирайте среди наших серий DURIS®, OSOLON® и SOLERIQ® именно те компоненты, которые нужны.

Light is OSRAM

OSRAM
Opto Semiconductors

Внимание: вышло из печати новое издание Справочной книги по светотехнике

Новое, четвёртое издание Справочной книги по светотехнике (СКС-4) подготовлено творческим коллективом ведущих российских специалистов под общим руководством доктора техн. наук, профессора, академика АЭН Айзенберга Ю.Б.

Книга объёмом около 900 страниц цветной печати содержит новые и актуальные материалы, отражающие революционные изменения светотехники в XXI веке.

В книге в основном не повторяются сведения из предыдущего издания, которые в открытом доступе целиком приведены на сайте журнала «Светотехника» (<https://l-e-journal.com/> → Архив → Справочная книга по светотехнике)

Прежде всего это:

- всё важное о светодиодах и области их эффективного использования;
- компьютерное моделирование осветительных установок и световых приборов;
- о современном световом дизайне и архитектурном освещении;
- автоматическое управление освещением зданий и наружного освещения;
- новейшие сведения о спортивном освещении и об освещении музеев;
- новое в широком использовании УФ-излучения;
- о теории светового поля и её практическом использовании.



Книга содержит подробные сведения о наружном освещении улиц, дорог, тоннелей с переходом от контроля освещённости к нормированию яркости.

- о свете в медицине;
- о проблемах освещения при освоении мирового океана и космоса.

Книга содержит актуализированные сведения о метрологии и фотометрии, а также полную информацию о незрительных воздействиях света на организм человека.

Авторами книги являются:

13 докторов наук-профессоров

19 кандидатов наук

20 специалистов разных направлений.

Тираж книги и её цена (ориентировочно 2,5 тыс. руб. на уровне СКС-3 2006 г.) будет определяться в зависимости от числа полученных заявок на книгу, направленных до **конца сентября 2019 года** в адрес редакции журна-

ла «Светотехника» (129626, Москва, Проспект Мира, дом 106, 346 комн.)

Ждём Ваших заявок.

При этом просьба указать Ваш адрес, телефон и e-mail, а также количество экземпляров для библиотек и специалистов.

Заявки отправлять на адрес:
bulgakova@l-e-journal.com

Уважаемые читатели!



В.П. Будак
д.т.н., профессор
BudakVP@gmail.com

Считаю главным событием последнего времени четырехгодичная конференция МКО в Вашингтоне (14–22 июня 2019 г.), в которой мне довелось принять участие. Региональные конференции МКО проводятся каждый год, но 4-х годичная сессия МКО призвана подвести итоги научно-технического прогресса в отрасли на текущий момент времени и составить планы на будущее. Поэтому размеры сессии были действительно масштабные: 3 пленарных, 93 устных на 22 секциях, 199 стендовых докладов на 2 сессиях и 9 практикумов по основным направлениям светотехники.

Из-за малости прошедшего времени после сессии трудно дать ей полную оценку, оценить представленный уровень светотехники и чётко выделить направления развития на будущее. Поэтому я расскажу о своих впечатлениях от сессий и практикумов, в которых принял участие. Что-то в духе «непутевых заметок» Д.Д. Крылова. Но хочется верить, что это подтолкнёт читателей к чтению трудов конференции – они выложены в свободном доступе постатейно на сайте МКО <http://www.cie.co.at/publications/cie-session-washington-2019>

На конференции были представлены все традиционные темы светотехники, но, на мой взгляд, главной темой была тема цвета – измерение, воспроизведение, представление. Этой теме было посвящено 60 статей в сборнике, 4 секции и 4 практикума. В докладах прозвучала особая актуальность колориметрии сегодня: возможность воспроизведения произвольных сюжетов на мониторах компьютеров, где особое место занимают синтетические изображения и виртуальная реальность (*virtual reality, VR*), а также возможность создания на базе светодиодов источников с произвольным спектром излучения. Существует единодушное мнение, что качество цвета – больше, чем просто точность цве-

топередачи по сравнению с тестом или контрольным источником света. МКО определяет качество цвета как визуальное восприятие яркости, естественности, привлекательности, цветовых различий, естественного восприятия различных или гармонии цветов, присутствующих в сцене.

Особое место во всех докладах занимали модели воспроизведения цвета (*color appearance model, CAM*). На сегодня основным стандартом является *CAM02*, хотя уже подготовлен *CAM16*, в докладах проведено их сравнение. Отмечено, что *CAM02* при высоких значениях яркости адаптации. Некоторые докладчики предлагали в своих выступлениях развития усовершенствованные модели, где главное внимание уделялось учёту явления Гельмгольца-Кольрауша.

Второй звучащей темой на мой взгляд на сессии была тема качественных показателей освещения, среди которых выделялись слепящее действие источников и пульсациям или временной модуляции света (*temporal light modulation, TLM*). На одной из сессий прозвучало, что «Блики – яркая пятно в освещении!» (*Glare is hotspot in Lighting industry!*).

Очень интересным был доклад, что в эпоху господства светодиодов мелкие яркие блики оказывают не слепящее, а являются интересной деталью светового дизайна: искорки – хороший блик! («*Sparkle, the good glare*», *Akashi et al., 2000*). Несколько докладов были посвящены ослеплённости светом окон при естественном освещении. Большинство докладчиков склонялись к мнению, что в сложных ситуациях дискомфорт в освещении наилучшим образом характеризует распределение яркости по полю наблюдения.

Все доклады были сосредоточены вокруг трёх основных проблем: физиологический или психологический механизм дискомфорта от чрезмерной яркости; модель дискомфорта, которая охватывает несколько областей применения; определение метода измерения бликов, который позволит обобщать результаты и применять их к другим условиям применения и освещения.

Временная модуляция света (*TLM*) осветительной продукции представляет интерес из-за её возможного неблагоприятного воздействия на здоровье и благо-

получие человека. Тема становится всё более актуальной из-за всплеска модулированного освещения от широко используемых сейчас светодиодов, питаемых от действующих драйверов на основе широко-импульсной модуляции или простого выпрямления переменного тока. Давно известно, что 100–120 Гц *TLM* может отрицательно влиять на зрительные характеристики и приводить к головной боли и усталости глаз, но только недавно появилась возможность и необходимость изучать эффекты *TLM* на других частотах с различными формами волны, рабочими характеристиками и диапазоном глубины модуляции.

Значительный интерес представляли доклады секции по фотобиологии. В начале этого столетия был открыт новый фоторецептор сетчатки, известный как внутренне светочувствительная ганглиозная клетка сетчатки (*intrinsically photosensitive retinal ganglion cells, ipRGCs*). *ipRGCs* мощно регулируют ежедневный 24-часовой ритм наших телесных часов и физиологии. Свет является основным синхронизатором циркадной системы человека, он может сдвигать фазу циркадного ритма и регулировать время и качество нашего сна, тем самым непосредственно влияя на наше здоровье, здоровье и способность спать или концентрироваться. Однако их исследование имеет значительные трудности, поскольку чувствительность *ipRGC* на два-три порядка ниже колбочек.

Уровень докладов сильно различался: от уровня бакалаврских работ кафедры светотехники в МЭИ до серьёзной научной работы. Насколько удалось пообщаться, особенно во время стендовых докладов, основной контингент докладчиков – либо аспиранты, либо представители промышленности, заинтересованные скорее в рекламе своих компаний, нежели научных исследованиях. Но уровень всех практикумов был самый высокий, их проводили высококлассные специалисты.

Собственно, это есть мой первый беглый взгляд на сессию МКО, который я посчитаю успешным, если он стимулирует нашими читателями материалов этой интересной и весьма полезной конференции.

НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ

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

УЧРЕДИТЕЛИ:

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

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ

Г.В. Боос, председатель редакционной коллегии, к.т.н., НИУ «МЭИ», Москва

С.Г. Ашурков, к.т.н., Москва

М.Л. Белов, д.т.н., проф., НИУ «МГТУ им. Н.Э. Баумана», Москва

Т. Берген (*Tony Bergen*), Технический директор Photometric Solutions International, Австралия

Г. Бизяк (*Grega Bizjak*), Люблянский университет, Словения

Л. Билунд (*Lars Bylund*), Bergen's School of architecture, Норвегия

П.Р. Бойс (*Peter R. Boyce*), Lighting Research Center, США

П. Блаттнер (*Peter Blattner*) Федеральный Институт Метрологии METAS, Швейцария

В. ван Боммель (*Wout van Bommel*), Philips Lighting, Нидерланды

А.А. Богданов, к.т.н., ОАО «ИНТЕР РАО Светодиодные Системы», С.-Петербург

Н.В. Быстрияева, 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

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.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

Шеф-редактор

Ю.Б. Айзенберг, д.т.н., проф., академик АЭН РФ

Главный редактор

В.П. Будаков, д.т.н., проф.; BudakVP@gmail.com

Зам. главного редактора и научный редактор англоязычной версии

Р.И. Столяревская, д.т.н.; lights-nr@inbox.ru

Старший научный редактор

Е.И. Розовский; lamptech@mail.ru

Научный редактор

С.Г. Ашурков; svetlo-nr@yandex.ru

Научный редактор

А.Ю. Басов; basov@bl-g.ru

Выпускающий редактор

П.А. Федорищев; fedorishchev@gmail.com

Зав. редакцией

М.И. Титаренко; zav.red@list.ru

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 Sehirli*), 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 08.07.19. Подписано в печать 08.08.19
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 4·2019

В НОМЕРЕ

ИЮЛЬ • АВГУСТ

Колонка главного редактора	3	Биста Д., Шреста А., Циссис Ж., Бхусал П., Топалис Ф.В., Чхетри Б. Текущее состояние освещения в Непале	84
Бизнес и инновации	28, 37, 51, 58, 70	СПРАВОЧНЫЕ МАТЕРИАЛЫ	
Прикупец Л.Б., Боос Г.В., Терехов В.Г., Тараканов И.Г. Оптимизация светотехнических параметров облучения при светокультуре салатно-зеленных растений с использованием светодиодных излучателей	6	Международные конференции и выставки в 2019 году (IV квартал)	21
Заева-Бурдонская Е.А., Назаров Ю.В. СВЕТлая сторона дизайна. Вектор профессии	14	ХРОНИКА	
Колгушкина С.В., Быстрянцева Н.В., Прокопенко В.Т. Исследование яркостных характеристик объектов с архитектурным освещением на центральных улицах города Тулы	24	Лесман Е.А. 85 лет Северную столицу освещает «Ленсвет»	93
Галатану К.Д., Ашраф М., Лукаче Д.Д., Бю Д., Чиугудеану К. Коэффициент использования для архитектурного освещения	30	ИНФОРМАЦИОННЫЕ МАТЕРИАЛЫ	
Сахана С., Рой Б. Разработка и анализ экономичного комплексного устройства управления освещением	39	Новые возможности в освещении от компании Osram	1
Спиридонов А.В., Умнякова Н.П. Обследование состояния исторических светопрозрачных конструкций ГМИИ им. А.С. Пушкина	47	Четвёртое издание Справочной книги по светотехнике	2
Бакир Кючуккая И., Алакавук У. Оценка соответствия административного здания требованиям программы LEED	52	МСК «БЛ ГРУПП» – лидер светотехнической отрасли России	22
Дель Агила А., Ефременко Д.С., Траутманн Т. Обзор методов снижения размерности при обработке гиперспектральных оптических сигналов	60	СветоСервис-Кубань – типовые и уникальные решения для качественного освещения	29
Мукур С.П., Канимкурбей Б., Кормаз А. Введение магнитного поля в электролюминесценцию органических светоизлучающих приборов, легированных наночастицами $CoFe_2O_4$	71	СветоСервис-СПб: «Реализуем проекты любой сложности!»	38
Прытков С.В., Сыромясов А.О. Расчёт светораспределения условно точечного источника света в произвольно ориентированной системе координат	79	Выставка Interlight Russia Intelligent Building Russia	46
		25 ярких лет: от «Интерсвета» к Interlight Russia Intelligent Building Russia	59
		Короткая Н.Д., Карташева Т.Л. Московский Дом Книги	94
		Пример комбинаций различных приёмов светодизайна в архитектурном освещении высоток в Москве: жилой дом на Кудринской площади, гостиница «Ленинградская» и административное здание на площади «Красные ворота»	1 с. обл.
		Преимущества выбора OPORA ENGINEERING	2 с. обл.
		Управление освещением – залог безопасности	3 с. обл.
		Подписка на журнал «Светотехника»	4 с. обл.

Оптимизация светотехнических параметров облучения при светокультуре салатно-зеленных растений с использованием светодиодных излучателей

Л.Б. ПРИКУПЕЦ¹, Г.В. БООС², В.Г. ТЕРЕХОВ¹, И.Г. ТАРАКАНОВ³

¹ ВНИСИ им. С.И. Вавилова, Москва

² НИУ «МЭИ», Москва

³ РГАУ-МСХА им. К.А. Тимирязева, Москва

E-mail: prikup@vnisi.ru

Аннотация

Представлены результаты завершающей фазы фотобиологических исследований по продуктивности салата и базилика, выращиваемых в условиях фитотрона при облучении излучением с разным соотношением долей в синем-красном и сине-зелёно-красном диапазонах области ФАР¹.

Установлены спектральные варианты ФАР, обеспечивающие максимальную или предельно близкую к ней продуктивность указанных культур.

Указано на сложный и неоднозначный характер влияния основных спектральных диапазонов ФАР на фотоэнергетические и фоторегуляторные процессы у растений, обеспечивающие их продуктивность, что делает невозможным определение общих унифицированных требований к оптимальным параметрам искусственного облучения для выращивания растений. Эти требования должны определяться на основе прямых фотобиологических экспериментов с основными видами сельскохозяйственных растений и являться важнейшим элементом общей макротехнологии светокультуры.

Рассмотрены общие принципы реализации установленных требований к спектрам ФАР фитооблучателей, в том числе с учётом создания нормальных зрительных условий для персонала теплиц и других сооружений защищённого грунта.

Ключевые слова: фотобиологические исследования, светокультура, фитооблучатель со светодиодами, фотосинтетически активная радиация (ФАР), спектр действия, фотосинтетический поток фотонов, фотосинтетическая фотонная облучённость,

фотосинтетическая фотонная эффективность.

Введение

Возможности получения прямых экспериментальных данных о влиянии излучения отдельных диапазонов ФАР на продуктивность конкретных видов растений с использованием светодиодных (СД) излучателей стимулируют фотобиологические исследования (ФБИ) во всём мире. На проходившем 16–20 июня в Анже (Франция) крупном международном симпозиуме по передовым технологиям и управлению инновационными теплицами «GreenSys 2019» указанное направление подтвердило свою приоритетность.

В настоящее время проблемы использования СД в выращивании растений переходят в практическую плоскость, в частности, в связи с быстрым ростом масштабов использования установок вертикального многоярусного выращивания салатно-зеленных растений под названием «City Farm».

Салатно-зеленные культуры – третья по распространённости группа

овощных растений, выращиваемых в теплицах России (рис. 1), и в связи с тем, что потребность населения страны в свежей, богатой витаминами зеленой продукции в холодное время года удовлетворяется не более чем на 20–30 %, потенциал развития производства здесь велик и научные достижения активно востребованы.

В статье [1] представлены результаты первой фазы ФБИ, проводимых авторами в условиях фитотрона по светокультуре салата и базилика (в РГАУ-МСХА им. К.А. Тимирязева) с использованием созданных специальных квазимонохроматических фитооблучателей с СД (ФО). Первые полученные данные в широком диапазоне варьируемых светотехнических параметров (спектр в области ФАР и уровень облучения) позволяют перейти к решению задачи оптимизации спектральных характеристик ФО для хозяйственного выращивания указанных культур.

Методика ФБИ и экспериментальная установка

По результатам первой фазы ФБИ [1] был установлен диапазон фотосинтетической фотонной облучённости (PPFD), 160–180 мкмоль/(с·м²), соответствующий максимальной продуктивности салата «Ландау» и базилика «Русский гигант». В дальнейшем все опыты с красно-синими (RB) и красно-зелёно-синими (RGB) ФО проводились при PPFD 170 ± 10 % мкмоль/(с·м²), что позволило сократить число дорогих и достаточно продолжительных вегетаций и соответствует положениям метода «суррогатной оптимизации», используемого в современной биологии при изучении эффектов воз-

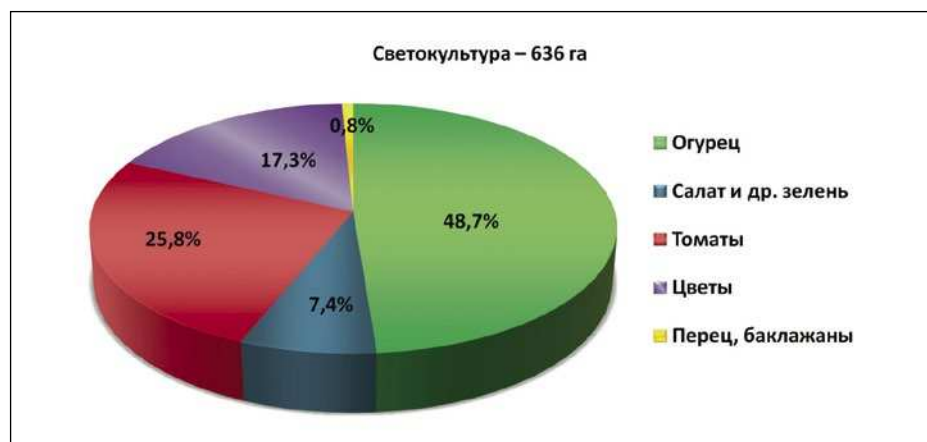


Рис. 1. Площади, занимаемые светокультурами овощей в теплицах России в 2019 г.

¹ См. также статью [1].

Основные параметры цветных (*R, G, B*) светодиодов, использованных в ФБИ

№	Тип СД (фирма-производитель)	Пиковая длина волны, нм	Спектральный диа- пазон излучения, нм, (по уровню 0,5)	Диапазон регулирова- ния по току, мА
1	<i>XPEEPR-L1-0000-00901, XPE HE Photo Red Light Emitting Diode (CREE)</i>	656	645–666	350–800
2	<i>XPEBGR-L1-0000-00F01, XLamp XP-E Light Emitting Diode Green (CREE)</i>	517	500–540	500–1100
3	<i>XTEARY-00-0000-000000Q01, XLamp XT-E Light Emitting Diode Royal Blue (CREE)</i>	447	435–458	500–1200

Таблица 2

Результаты «бинарной оптимизации»

№	1	2	3	4	5	6	7	8
Тип спектра	<i>R 100 % B 0 %</i>	<i>R 90 % B 10 %</i>	<i>R 80 % B 20 %</i>	<i>R 0 % B 40 %</i>	<i>R 50 % B 50 %</i>	<i>R 40 % B 60 %</i>	<i>R 32 % B 68 %</i>	<i>R 0 % B 100 %</i>
Вес (салат), г	92,5 ± 13,2	71,5 ± 5,2	98,7 ± 10,5	56,7 ± 13,9	76,9 ± 7,6	59,0 ± 12,2	66,6 ± 14,8	69,3 ± 3,5
Вес (бази- лик), г	25,8 ± 5,7	55,1 ± 12,3	65,9 ± 14,7	51,2 ± 6,9	58,2 ± 5,0	65,9 ± 5,7	30,5 ± 7,8	18,7 ± 8,5

действия на растения внешних факторов [2–4].

Задачей второй фазы ФБИ, которые также проводились в фитотроне РГАУ-МСХА им. К.А. Тимирязева, было исследование эффектов совместного воздействия излучения основных диапазонов ФАР.

Эксперимент был построен так, что вначале исследовалось влияние на продуктивность салата и базилика разного соотношения уровней излучения в красном (*R*) и синем (*B*) диапазонах (*RB* – «бинарная оптимизация»), а затем к ним добавлялись разные доли излучения зелёного диапазона ФАР (*RGB* – «триадная оптимизация»).

В соответствии с этим на АО «КЭТЗ» по заданию ВНИСИ были изготовлены две группы ФО, *RB* и *RGB* типов, с параллельным включением СД указанных цветов и возможностью независимого управления токами и фотосинтетическим фотонным потоком (*PPF*), соответственно, по двум или трём цветовым каналам.

В ФО, как и в первой фазе ФБИ, использовались *R, G* и *B* мощные СД фирмы *CREE* (табл. 1). Изменением тока в каждом из каналов (предварительно снималась зависимость *PPF* от тока) можно было варьировать долю каждого диапазона в суммарной облучённости от 0 до 100 %. Устройством регулирования тока ФО служили

управляющее устройство («драйвер») *OT180W/UNV1250C* и программатор *Optotronic OT programmer* фирмы *OSRAM* (рис. 2).

Измерения спектра излучения ФО проводились с помощью спектрометра *PC100N* фирмы *UPRtek* (Тайвань) с программным обеспечением фирмы «Интех-Лайтинг» (РФ), *PPFD* в каждом диапазоне и суммарная *PPFD* определялись с помощью измерителя уровня освещённости *Li-250A* с квантовым датчиком *Li-190R* (фирма *LI-COR*, США).

Остальные условия эксперимента соответствовали требованиям принятой в указанном фитотроне технологии выращивания салатно-зеленных культур:

• Эксперименты проводились при постоянном 18-ч фотопериоде при температурах воздуха днём и ночью 22 и 18 °С соответственно. Растения выращивались в вегетационных сосудах с питательной смесью «Агробалт С» по 3 (салат) или 5 (базилик) штук. Субстрат – верховой нейтральный сфагновый торф низкой степени разложения, с влажностью не более 65 %, содержащий известняковую (доломитовую) муку и комплексное удобрение ($N_{\text{общ}}$ – 150 мг/л, P_2O_5 – 150 мг/л, K_2O – 250 мг/л, Mg – 30 мг/л, Ca – 120 мг/л, микроэлементы), *pH* 5,5–6,6. Полив проводился по весу, поддерживалась влажность 70 % ПВ, повторность – четырёхкратная.

Рис. 2. Блок-схема регулирования параметров фитооблучателей со светодиодами в ФБИ



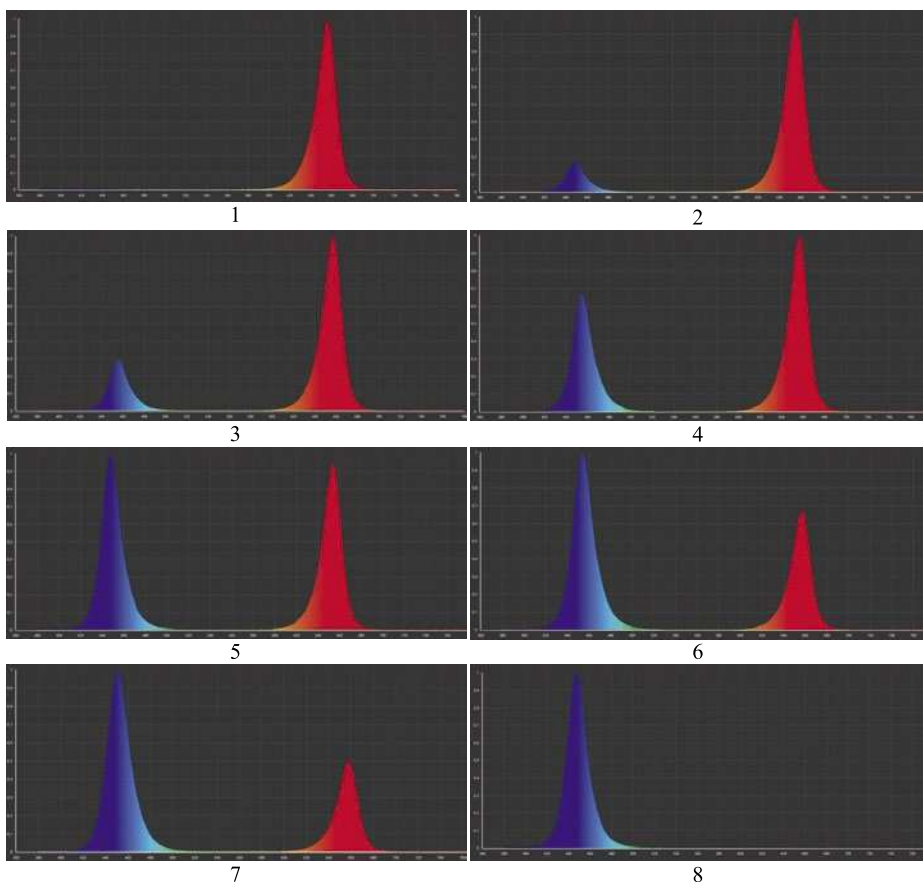


Рис. 3. Варианты спектров при «бинарной оптимизации»: 1–100 % R , 0 % B ; 2–90 % R , 10 % B ; 3–80 % R , 20 % B ; 4–60 % R , 40 % B ; 5–50 % R , 50 % B ; 6–40 % R , 60 % B ; 7–32 % R , 68 % B ; 8–0 % R , 100 % B

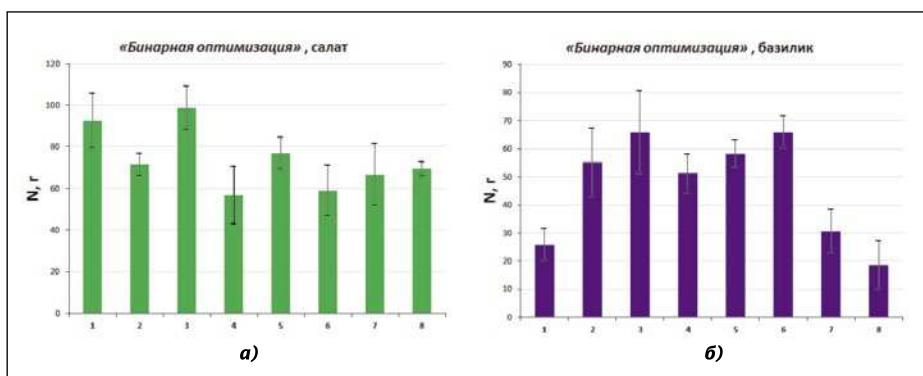


Рис. 4. Диаграммы продуктивности салата (а) и базилика (б) при «бинарной оптимизации»

- Учёт биомассы урожая и другие определения проводились через 35 дней от всходов, учитывалась общая биомасса на сосуд.

Результаты ФБИ и их обсуждение

«Бинарная оптимизация»

Спектры реализованных восьми R - B комбинаций и соответствующие им доли $PPFD_R$ и $PPFD_B$ в суммарной облучённости $PPFD_{R+B}$ приведены на рис. 3 и в табл. 2. Там же представлены полученные при этих условиях

результаты вегетаций – продуктивность N .

Сразу отметим, что зависимости N от соотношения R и B долей излучения для салата и базилика существенно различны (рис. 4). Представив множество значений N салата в функции этого соотношения с помощью линейной аппроксимации (рис. 5), можно увидеть, что роль и влияние R диапазона ФАР на синтез биомассы – однозначно определяющие. При этом с ростом R доли излучения N салата растёт, так же как она падает с ростом B доли излучения. В отличие от сала-

та зависимость N базилика от соотношения долей R и B может быть представлена кривой с максимумом, соответствующим R доле 50–80 % и доле B , соответственно, 50–20 %. Объединяющим обе культуры требованием, является достаточность B доли излучения (в области ФАР) – на уровне порядка 20 %.

«Триадная оптимизация»

Исследование зависимости N салата и базилика от соотношения R , G , B долей излучения (рис. 6) явилось следующей, завершающей стадией «суррогатной оптимизации» спектра для указанных культур.

В табл. 3 и на рис. 7 приведены данные по восьми реализованным вегетациям с разными соотношениями указанных R , G , B долей и соответствующим результатам по N салата и базилика, а на рис. 8 представлена трёхмерная визуализация зависимости N (полезная биомасса, г) от R и B долей излучения (учитывая, что $G = 100 - (R + B)$), выполненная с помощью программы «Wolfram Mathematica» на трёхмерной сетке с использованием линейной интерполяции. Окраска поверхности графической модели соответствует реальному цвету спектра в заданном диапазоне R и B по осям координат.

Наглядность приведённых 3D-моделей позволяет высказать следующие качественные оценки совместного действия R , G , B долей ФАР:

- В зоне максимальной продуктивности для обеих культур очевидно приоритетное влияние R («красного») излучения, причём для салата в большей степени.

- Преобладающая доля B («синего») излучения однозначно резко снижает N . Из табл. 2–3 и рис. 4, а и 7, а видно, что максимальные N салата были достигнуты при полностью R излучении ($R_{100\%}$), а также при вариантах $R_{80\%}:B_{20\%}$ и $R_{75,2\%}:G_{13\%}:B_{11,8\%}$. Снижение N до 40 % и ниже соответствовало существенному преобладанию B излучения. Присутствие G («зелёного») излучения в области ФАР не является обязательным, но допустимо.

Соответствующие данные по базилику – табл. 2–3 и рис. 4, б и 7, б – указывают на сложный характер совместного влияния RGB излучения на эту культуру; лучшие результаты по весу биомассы (N) были зафиксированы в вегетации с триадной комбинацией $R_{62,4\%}:G_{17,7\%}:B_{19,9\%}$, причём

Результаты «триадной оптимизации»

№	1	2	3	4	5	6	7	8
Тип спектра	R 77 % G 12 % B 11 %	R 75,2 % G 13,0 % B 11,8 %	R 62,4 % G 17,7 % B 19,9 %	R 49,0 % G 36,0 % B 15,0 %	R 43,6 % G 21,5 % B 34,9 %	R 30,0 % G 50,0 % B 20,0 %	R 27,0 % G 31,1 % B 41,9 %	R 17,2 % G 13,7 % B 69,1 %
Вес (салат), г	78,9 ± 14,4	84,7 ± 14,8	72,8 ± 4,0	62,5 ± 3,8	67,5 ± 12,4	76,5 ± 14,8	68,6 ± 11,9	50,8 ± 6,4
Вес (базилик), г	49,8 ± 8,6	45,9 ± 11,1	73,1 ± 8,1	54,7 ± 15,7	26,6 ± 4,8	54,7 ± 5,0	37,0 ± 6,4	43,7 ± 8,5

ближайшие по N результаты были получены для бинарных R - B комбинаций $R_{80}\%: B_{20}\%$ и $R_{40}\%: B_{60}\%$.

Отметим, что для базилика, по-видимому, присутствие в полихроматическом спектре R излучения даже в минимальных долях совершенно необходимо. При этом при полностью B излучении N составляла лишь 25 % от возможного максимума. Однако весьма неблагоприятно также облучение базилика одним лишь R излучением (порядка 35 % от максимума N).

На рис. 9 представлены спектральные комбинации, обеспечивающие максимальную или близкую к ней продуктивность для салата и базилика. Очевидно, что в фотосинтетической фотонной и энергетической системах величин эти данные будут различаться. Связь между значениями долей излучения в исследуемых диапазонах определяется с помощью выражения $PPFD = K \cdot E_e$, где E_e – облучённость, Вт·м⁻²;

$$K = (h \cdot c \cdot N_A)^{-1} \times \int_{400}^{700} e(\lambda) \lambda d\lambda / \int_{400}^{700} e(\lambda) d\lambda,$$

мкмоль·Дж⁻¹; $e(\lambda)$ – спектральная плотность облучённости, Вт·м⁻²·нм⁻¹; λ – длина волны излучения, нм; h – постоянная Планка, Дж·с; c – скорость света, м/с; N_A – число Авогадро, мкмоль⁻¹.

Укажем также на весьма важное для практики обстоятельство: при использовании спектра ФАР RB или RGB типов при доле R излучения менее 75 % для салата и менее 50 % для базилика обеспечение высокой N этих культур не удаётся.

В последние годы в ряде зарубежных стран выполнено несколько интересных работ, в которых содержатся результаты ФБИ по N салатно-зеленных растений при вариации спектра ФАР. Представляет интерес кратко со-

Рис. 5. Графическая интерпретация результатов «бинарной оптимизации»

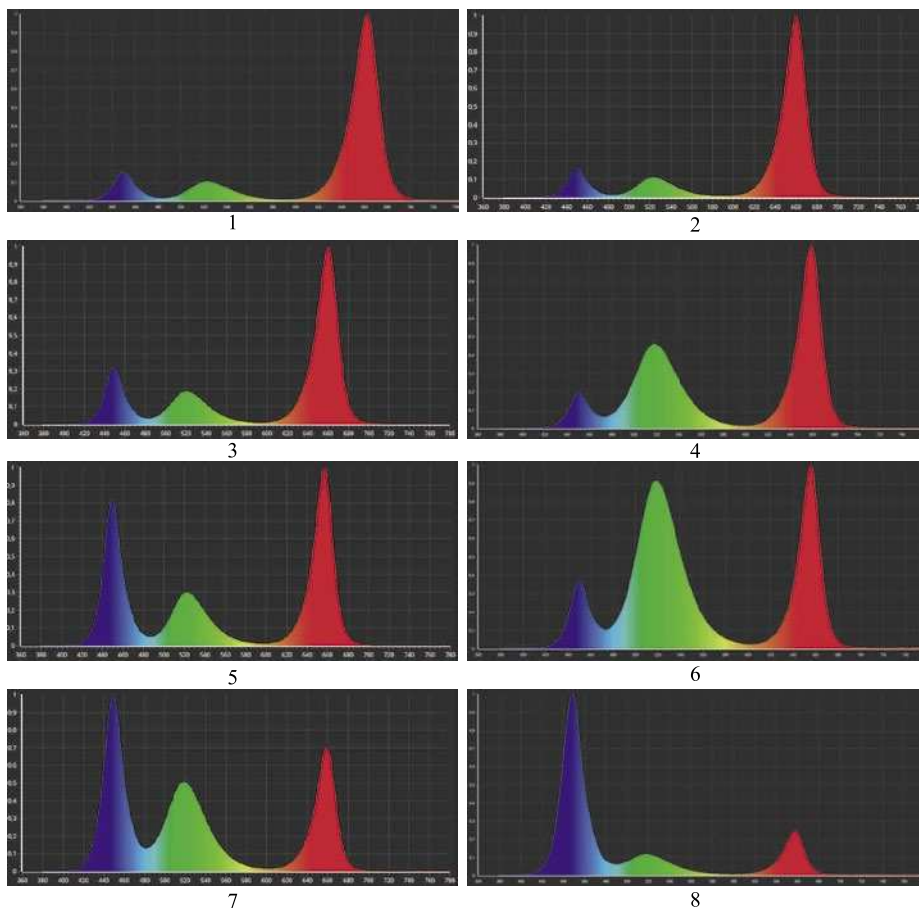
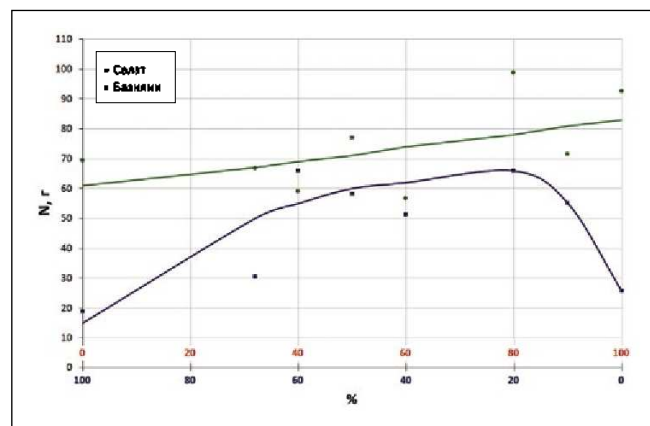


Рис. 6. Варианты спектров при «триадной оптимизации»:

1–77 % R, 12 % G, 11 % B; 2–75,2 % R, 13 % G, 11,8 % B; 3–62,4 % R, 17,7 % G, 19,9 % B; 4–49 % R, 36 % G, 15,0 % B; 5–43,6 % R, 21,5 % G, 34,9 % B; 6–30 % R, 50 % G, 20 % B; 7–27 % R, 31,1 % G, 41,9 % B; 8–17,2 % R, 13,7 % G, 69,1 % B

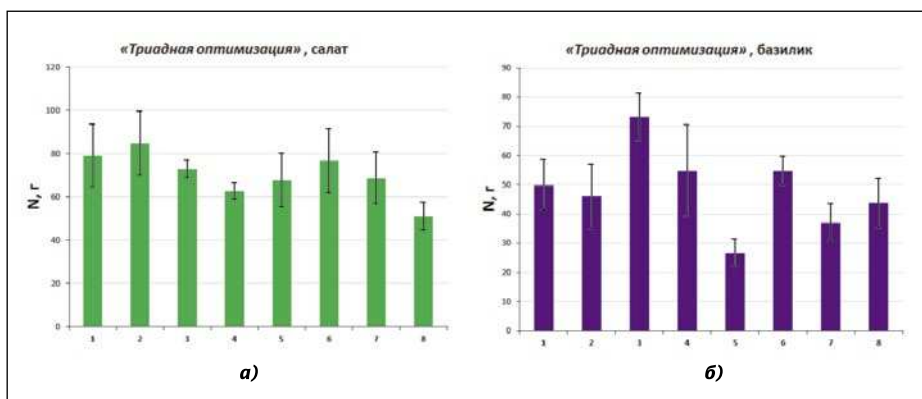


Рис. 7. Диаграммы продуктивности салата (а) и базилика (б) при «триадной оптимизации»

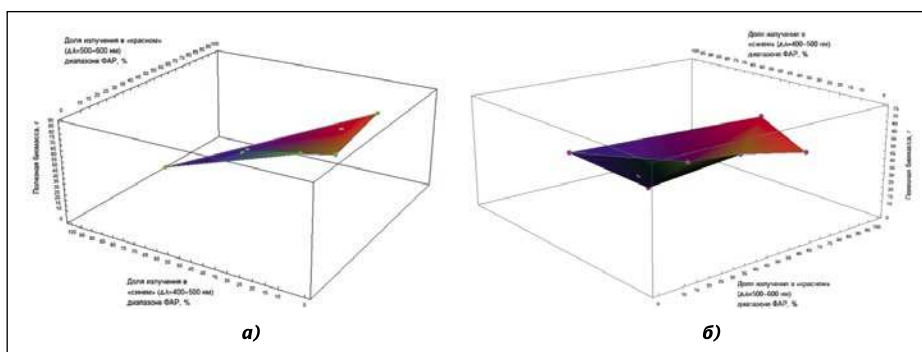


Рис. 8. 3D модели продуктивности салата (а) и базилика (б) при «триадной оптимизации»

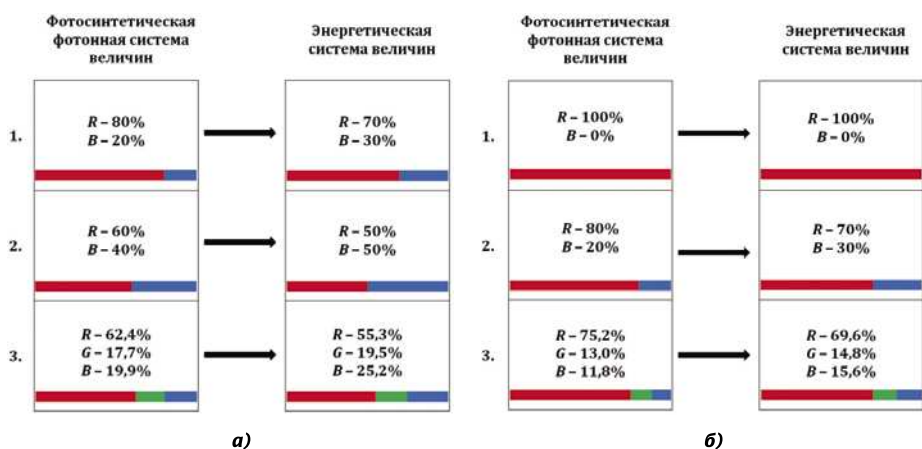


Рис. 9. Наиболее благоприятные спектральные характеристики в области ФАР для салата (а) и базилика (б)

поставить их данные с представленными в данной статье.

В одной из первых серьёзных работ, связанных с использованием ФО с СД, [5], отмечалось, что добавление к RB излучению G излучения (с помощью зелёных ЛЛ с достаточно широким спектром) при G доле в 24 % повышало N салата почти в 1,5 раза, а рост этой доли до 51 % влиял на N отрицательно.

В публикации [6] указано, что данные многих исследований о влиянии G излучения на N салатно-зеленных

растений весьма неоднозначны и колеблются от «вредное» до «весьма полезное».

В работе, выполненной специалистами Тайваньского национального университета в условиях фитотрона, салат сорта «*Boston lettuce*» выращивался при $PPFD$ 210 мкмоль/(с·м²) с фотопериодом 16 ч в течение 35 дней при облучении ФО с СД с RB и RWB (добавка белого, W) спектрами, а также под ЛЛ холодно-белого света [7]. Максимум N соответствовал RWB комбинации, ва-

риант с ЛЛ оказался на 10 % ниже, а RB комбинация показала результат на 17 % ниже максимального.

Упомянем ещё о небольшом эксперименте, проведённом в Республике Корея фирмой *Samsung* в сотрудничестве с Сеульским национальным университетом [8–9]. Салат и базилик выращивались при значении $PPFD$ 160 мкмоль/(с·м²), близком к принятому в наших ФБИ, при использовании ФО с разными вариантами спектров: $R_{44,5}G_{44,5}B_{11}$; $R_{40}G_{40}B_{20}$; $R_{79}G_{14}B_7$ и $R_{80}B_{20}$. Для салата лучшим по N оказался первый из них (с равными R и G долями и минимальной B долей, а худший результат (с на 56 % уменьшенной N) показала бинарная комбинация $R_{80}B_{20}$. При этом для базилика различия в эффективности указанных вариантов спектра излучения не превышали 15 %.

В наиболее серьёзном исследовании по воздействию на салат разноспектральных излучений в области ФАР [10] также указано на противоречивость данных разных авторов о спектральной эффективности ФАР в плане урожайности. В первую очередь это касается влияния G доли излучения. Указано также на негативное влияние на рост и развитие овощных растений уменьшения соотношения R и B долей ($R : B$) в области ФАР. В собственных ФБИ, по оригинальной методике, салат двух сортов – «*Rex*» и «*Rouxai*» – выращивался в условиях фитотрона сначала 10 дней под ФО белого света с $T_{ккл}$ 2700 К ($FR : R : G : B = 10,1 \% : 54,5 \% : 28,85 \% : 6,5 \%$) при $PPFD$ 180 мкмоль/(с·м²)². Далее растения пересаживались в ОУ с 10-ю разными спектральными вариантами (рис. 10). Отметим, что R доля излучения оставалась постоянной в абсолютном выражении – $PPFD_R$ 120 мкмоль/(с·м²), что составляло 66,7 % от полного излучения ($PPFD_{ФАР}$ и $PPFD_{ФАР+ИК}$). В последних двух вариантах использовались «тёплые» (WW) и «холодные» (EQW) ФО с полным ($FR-R-G-B$) спектром.

Результаты этих ФБИ приведены на рис. 11. Максимальная N салата «*Rex*» была достигнута в вариантах с RG (!) излучением ($R : G = 66,7 \% : 33,3 \%$), а – салата «*Rouxai*» –

² Как видим, помимо влияния ФАР оценивалось влияние на N салата ИК излучения в спектральном диапазоне 760÷800 нм (FR излучение).

при *FR-R* излучении ($FR : R = 33\% : 66,7\%$).

Повышенная эффективность *G* излучения, установленная автором рассматриваемой статьи, позволила ему высказать предположение, что влияние *G* диапазона области ФАР на *N* салата сопоставимо с таковым для *B* диапазона и составляет примерно 50% от эффективности *R* излучения. Кроме того в ряде случаев, при существенно различных спектральных характеристиках ФО им были получены одинаковые или предельно близкие результаты по *N* обоим сортам салата.

Подводя итог обсуждению собственных результатов и сравнению их с результатами зарубежных исследований по *N* салатно-зеленым растениям, отметим следующее:

- Результаты наших исследований и достаточно большой объём данных в цитируемых работах позволяют утверждать, что оценка совместного действия разных спектральных диапазонов ФАР на *N* растений, на примере салатно-зеленных культур, осложнена синергетическими (суперрадитивными) или, наоборот, антагонистическими эффектами взаимодействия, видимо, характерными для растений как сложных приёмников излучения с большим количеством фотопигментов. Иначе говоря, понятие «оптимальный спектр излучения для выращивания растений» – достаточно абстрактно и неопределённо. Даже для растений одного вида требования к благоприятному спектру, обеспечивающему максимум *N*, могут заметно различаться.

- Сложный характер взаимодействия фотоэнергетических и фоторегуляторных процессов у растений может приводить к получению одинаковых или близких эффектов действия (*N*) для существенно различающихся по спектру излучения в областях ФАР и ближней ИК. Об этом свидетельствуют данные наших ФБИ с салатом и базиликом и результаты работ других исследователей. Поэтому мы можем высказать предположение о применимости к воздействию излучения на растения понятия о **эквивифиальности**, сформированного в 1960-е гг. австрийским биологом Л. Бергаланфи. Эффект фотоэквивифиальности, как свойство саморегулирующейся системы, каковой является высшее растение, безусловно, может быть предметом дальнейших исследований.

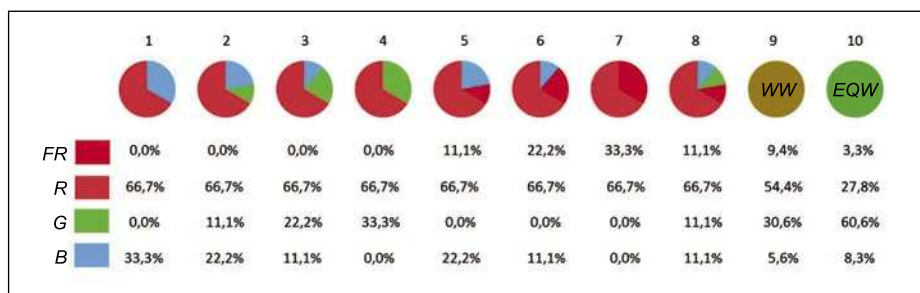


Рис. 10. Варианты опытов в работе [10] при разных спектральных комбинациях ФАР и ближней ИК области

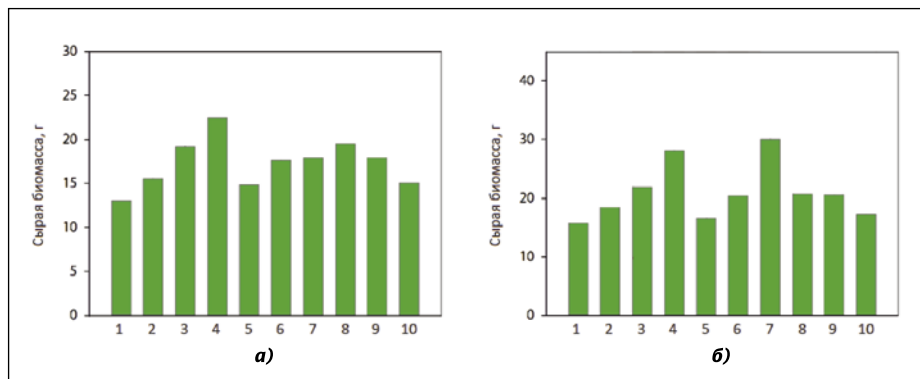
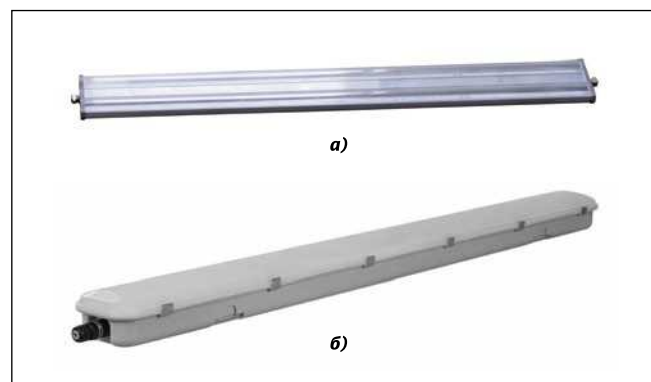


Рис. 11. Диаграммы продуктивности салатов «Rex» (а) и «Rouxi» (б) при разных спектральных комбинациях ФАР и ближней ИК области [10]

Рис. 12. Top-облучатель со светодиодами Galad «Топ Лайн Фито LED», мощность 230 Вт (а) и облучатель со светодиодами для многоярусных установок Galad «Арклайн Фито LED», мощность 30 и 60 Вт (б)



Практическая значимость результатов

В одном из основных докладов на симпозиуме «GreenSys 2019» [11] приветствовалось увеличение масштабов ФБИ растений с использованием СД техники, но при этом отмечалось, что существует некоторый разрыв между научными результатами и их использованием на практике. Отметим, что планируя настоящие ФБИ [1], мы назвали их главной задачей практическую направленность. Иначе говоря, требования к спектральным характеристикам ФО для традиционного верхнего (*top*) облучения салатно-зеленных растений в теплицах и для их выращивания в многоярусных вертикальных фитоустановках типа «City

Farm» должны составляться с учётом результатов настоящих ФБИ с салатом и базиликом.

Полученные нами на основе прямых экспериментов данные дают определённую «свободу выбора» разработчику облучательных приборов, позволяя определять спектральные характеристики последних не только из условия максимизации *N* растений, но и с учётом энергоэффективности СД, их ценовых параметров и, что совершенно необходимо, исключения вредного воздействия «синего» излучения на зрение обслуживающего персонала [12, 13]. В ряде случаев потребителем может выдвигаться ещё одно существенное для фитоустановок требование: необходимость правильного визуального восприятия зеленой про-

Основные параметры цветных светодиодов ведущих производителей

Производитель (страна)	Тип	Рассчитанный минимальный <i>EPPF</i> , мкмоль/с	Доминантная длина волны, нм	Прямой ток, мА	Прямое напряжение, В	<i>EPPF</i> , мкмоль/Дж
CREE (США)	<i>XPEBPR-L1-0000-00D01</i> <i>XP-E2 Photo Red</i>	2,5	min 650 max 670	350	2,05	3,44
	<i>XPGRDY-L1-0000-00601</i> <i>XP-G3 Royal Blue</i>	2,8	min 450 max 465	350	2,82	2,83
	<i>XPEBGR-L1-0000-00F01</i> <i>XLamp XP-E Light Emitting Diode Green</i>	1,11	min 520 max 535	350	3,2	0,99
OSRAM Opto semiconductors (ФРГ)	<i>GH CSSRM3.24-V5V7-1</i> <i>Oslon Square Hyper Red</i>	5,27	min 646 max 666	700	2,1	3,52
	<i>GD CSSPM1.14-UO</i> <i>OSLON SSL 120 Deep Blue</i>	2,63	min 439 max 457	350	2,85	2,33
	<i>GD CSSRM2.14-ARAT-24-1</i> <i>Deep Blue</i>	5,25	min 444 max 457	700	2,9	2,59
Lumileds (Нидерланды)	<i>LUXEON SunPlus 20 Line</i> <i>Royal Blue</i> <i>LISP-RYL0002F00000</i>	2,25	min 445 max 455	350	2,5	2,3
	<i>LUXEON SunPlus 35 Line</i> <i>Deep Red</i> <i>LISP-DRD0002F00000</i>	2,08	min 655 max 670	350	1,95	2,9
Samsung (Республика Корея)	<i>LH351H Deep Red</i>	2,32	min 650 max 670	350	2,1	3,12
	<i>LH351H Blue</i>	2,8	min 440 max 460	350	2,86	2,8
	<i>LH351H Far Red</i>	1,96	min 720 max 740	350	1,9	2,91
Prolight Opto Technology Corporation (Тайвань)	<i>PK2N-3LDE-HSD-U Royal Blue</i>	2,84	min 448 max 458	350	2,9	2,8
	<i>PK2N-3LME-HSD-T Crimson</i>	2,64	min 650 max 670	350	2,05	3,83
	<i>PK2N-4LME-HSDL-X2 Crimson</i>	5,78	min 650 max 670	700	2,15	3,92

дукции («визуальная органолептика») с целью оценки её качества и товарного вида («окрашиваемость» листьев, отсутствие пятен, повреждений насекомыми-вредителями и т.п.).

С учётом всех этих обстоятельств проблема выбора между вариантами квазимонохроматического *R*, бинарного *RB* или *RGB* спектров может быть решена в пользу последнего как для салата, так и для базилика.

Практическая реализация основных на ФБИ требований к спектральным характеристикам ФО должна производиться с учётом уровня фотосинтетической фотонной эффективности (*EPPF*) используемых в них СД.

В табл. 4 представлены основные параметры цветных СД по собственным данным лидирующих производителей (по состоянию на середину 2019 г.).

EPPF СД имеет важнейшее значение и определяет их конкурентные преимущества перед фито-НЛВД, *EPPF* которых равен 1,8–2,1 мкмоль/Дж (у светильника с НЛВД – 1,55–1,8 мкмоль/Дж).

Из табл. видно, что ФО с квазимонохроматическими *R* СД может иметь *EPPF* до 3,3–3,4 мкмоль/Дж (с учётом электрических потерь в управляющем устройстве и оптических потерь, около 12 %), а ФО с бинарным *RB* спектром – 3,0–3,1 мкмоль/Дж.

При создании ФО с *RGB* спектром, с учётом низкой пока энергоэффективности зелёных СД (*EPPF* < 1 мкмоль/Дж) более целесообразно обеспечивать требуемую спектральную композицию ФАР с помощью комбинации синего СД с люминофором и красного СД.

Указанные подходы реализованы при создании совместно со специалистами ОАО «КЭТЗ» серии фитооблучателей для верхнего (*top*) облучения салатно-зеленных растений в традиционных теплицах, а также для выращивания тех же культур в многоярусных фитоустановках типа «*City Farm*» (рис. 12). Конструкция облу-

чателей позволяет реализовывать указанные выше спектральные комбинации с учётом особенностей и комплекса требований конкретного проекта.

Из выражения для критерия эффективности ОУ для фитоустановки

$EPPF_{\text{ОУ}} = PPFD_{\text{ср}} / P_1$, где $PPFD_{\text{ср}}$ – средняя $PPFD$ ценноза, мкмоль/(с·м²), и P_1 – удельная установленная электрическая мощность, Вт/м² [14], следует, что только за счёт более высокой $EPPF$ ФО достижимо снижение энергозатрат по сравнению с НЛВД не менее, чем на 40 %.

Заключение

Проведённые ФБИ определили требования к благоприятным спектрам излучения ФО с СД, обеспечивающим максимальную продуктивность салата и базилика. Существенное различие этих требований для данных культур показывает неизбежность использования экспериментального подхода к решению такого рода задач.

В связи с тем, что физические принципы СД техники позволяют выполнять выявленные данными ФБИ требования не только к благоприятному спектру, но, что не менее важно, и к уровню облучения [1], можно констатировать наличие возможности создания светотехнической технологии (как важнейшего элемента макротехнологии светокультуры конкретных растений) с компьютерным управлением хозяйственного выращивания растений («*cyber-agriculture*»).

Исследования проводились при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования в рамках проекта «Комплексные исследования в области светокультуры растений и создание высокоэффективных светодиодных фитооблучателей, обеспечивающих повышение энергоэффективности промышленных теплиц». Соглашение от 26.09.2017 г. № 14.576.21.0099 о предоставлении субсидии. Идентификатор Соглашения: 0000000007417PD20002. Уникальный идентификатор работ (проекта): RFMEFI57617X0099.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Прикупец Л.Б., Боос Г.В., Терехов В.Г., Тараканов И.Г. Исследование влияния излучения в различных диапазонах области ФАР на продуктивность и биохимический состав биомассы салатно-зеленых культур // Светотехника. – 2018. – № 5 – С. 6–12.

2. Arielle J. Johnson, Elliot Meyerson, John de la Parra, Timothy L. Savas, Risto Mikkulainen, Caleb B. Harper. Flavor-cyber-agriculture: Optimization of plant metabolites in an open-source control environment through surrogate modeling // PLOS ONE. – 2019. – April. URL: <https://journals.plos.org/plosone/article?id=10.1371/journal.pone.0213918> (дата обращения: 15.06.2019).

3. Koziel S., Ciaurri D.E., Leifsson L. Surrogate-Based Methods // Computational Optimization, Methods and Algorithms /Ed. by S. Koziel, Xin-She Yang. – Berlin, Heidelberg: Springer, 2011. – P. 33–59. DOI: 10.1007/978-3-642-20859-1_3 P. 33–59.

4. Shahriari B., Swersky K., Wang Z., Adams R.P., De Freitas N. Taking the human out of the loop: A review of Bayesian optimization // Proc IEEE. – 2015. – Vol. 104, Is. 1. – P. 148–175. URL: <https://doi.org/10.1109/JPROC.2015.2494218> (дата обращения: 15.06.2019).

5. Kim H.H., Goins G.D., Wheeler R.M., Sager J.C. Green-light supplementation for enhanced lettuce growth under red-and blue-light-emitting diodes // HortSci. – 2004. – Vol. 39. – P. 1617–1622.

6. Bugbee B. Towards an optimal spectral quality for plant growth and development: The importance of radiation capture / ActaHortic 1134_1, 2016. – P. 1–12.

7. Kuan-Hung Lin, Meng-Yuan Huang, Wen-Dar Huang, Ming-Huang Hsu, Zhi-Wei Yang, Chi-Ming Yang. The effects of red, blue, and white light-emitting diodes on the growth, development, and edible quality of hydroponically grown lettuce (*Lactuca sativa* L. var. capitata) // Scientia Horticulturae. – 2013. – Vol. 150. – P. 86–91.

8. Клейменов М. Разработки Samsung для освещения растений // Полупроводниковая светотехника. – 2019. – № 2 – С. 38–41.

9. URL: <https://e-neon.ru/novosti/razrabotki-samsung-dlja-osveshhenija-rastenij> (дата обращения: 15.06.2019).

10. Qingwu Meng. Spectral manipulation improves growth and quality attributes of leafy greens grown indoors / Phd dissertation. – Michigan State University, 2018.

11. Dieleman A., Weerheim K., Kruidhof M. Design of lighting strategies for sustainable horticulture / GreenSys 2019 – International symposium on advanced technologies and management for innovative greenhouse. URL: <https://www.greensys2019.org> (дата обращения: 05.07.2019).

12. URL: <http://www.cie.co.at/publications/position-statement-blue-light-hazard-april-23-2019> (дата обращения: 05.07.2019).

13. IEC62471:2006/CIE S009:2002 «Sécurité photobiologique des lampes et des appareils utilisant des lampes / Photobiological safety of lamps and lamp systems» (bilingual edition).

14. Прикупец Л.Б. Технологическое освещение в агропромышленном комплексе России // Светотехника. – 2017. – № 6. – С. 6–14



Прикупец Леонид Борисович,

кандидат техн. наук. Окончил с отличием в 1970 г. МЭИ. Зав. лабораторией ВНИСИ им. С.И. Вавилова. Член редколлегии журналов «Светотехника» и «Light & Engineering»



Боос Георгий Валентинович,

кандидат техн. наук, доцент. Окончил в 1986 г. МЭИ. Президент и член Совета директоров МСК «БЛ Групп». Зав. кафедрой светотехники НИУ

«МЭИ». Лауреат Государственной премии РФ. Председатель редколлегии журналов «Светотехника» и «Light & Engineering»



Терехов Владислав Геннадьевич,

инженер. Окончил с отличием Московский государственный университет экономики, статистики и информатики по

специальности «Прикладная информатика в экономике». Руководитель департамента по продвижению МСК «БЛ Групп» и научный сотрудник ВНИСИ им. С.И. Вавилова. Член оргкомитета Всероссийской конференции «Нитриды галлия, индия и алюминия. Структуры и приборы» и эксперт по энергосберегающим технологиям в освещении Российского союза строителей



Тараканов Иван Германович,

доктор биол. наук, профессор. Окончил в 1978 г. МСХА им. К.А. Тимирязева. Зав. кафедрой «Физиология растений» РГАУ-МСХА им. К.А. Тимирязева

СВЕТлая сторона дизайна. Вектор профессии

Е.А. ЗАЕВА-БУРДОНСКАЯ¹, Ю.В. НАЗАРОВ²

¹ МГХПА им. С.Г. Строганова, Москва

² АНО ВО «Национальный институт дизайна», Москва

E-mail: lenartt@gmail.com

8.916.628–13–34

«Главный враг знания – не невежество, а иллюзия знания»

Стивен Хокинг

Аннотация

Данная публикация посвящена одному из наиболее активно развивающихся видов дизайнерской проектной деятельности – светодизайну. Материалом статьи являются высказывания ведущих отечественных и зарубежных экспертов в области светодизайна, появившиеся в печати за последние пять лет, и собственные выводы авторов. В статье приводятся порой противоположные суждения, отражающие широкий спектр профессиональной практики и сопоставляющие часто не совпадающие исходные позиции экспертов-аналитиков. Все без исключения специалисты отмечают междисциплинарный характер новой профессии, что накладывает дополнительную нагрузку на проектировщика, и без того перегруженного кругом и темпом решаемых сегодня задач. Начатый на страницах профессиональных изданий разговор о новой профессии светодизайнера особенно важен в связи с разработкой профстандартов и стандартов дизайнерского и архитектурного образования, а также с созданием новых учебных программ на платформе различных подходов к теме в технических и гуманитарных вузах. Цель данной публикации – ввести светодизайн в круг полноправных разделов проектной культуры, определить подлинную научную базу новой творческой профессии, положить начало самоопределению нового синтетического направления, заметного влияющего на состояние профессии, заметного влияющего на состояние жизни широкого круга потребителей. Для достижения поставленной цели был выбран сравнительно-аналитический метод исследования, позволяющий достаточно широко и всесторонне изучить наметившуюся проблему и обозначить пути решения возникающих в сфере нового вида деятельности актуальных задач.

Ключевые слова: светодизайн, проектная культура, комфортная среда обитания, творческое воображение, архитектурное освещение, светящиеся формы, видеомеппинг, фестиваль света, инженер-светотехник, светодизайнер, художественные приёмы освещения, световая архитектура.

1. Введение

Пожалуй, сложно найти область проектной деятельности, сопоставимую по динамике развития в последние годы со светодизайном, разве что – медиа-дизайн, уверенно набирающий обороты благодаря интенсивному совершенствованию технологий. Так что цель данной публикации – полноправно ввести светодизайн в круг разделов проектной культуры, определить подлинную научную базу новой творческой профессии, положить начало эмансипации этого синтетического направления, заметного влияющего на состояние профессии в целом и на качество жизни широкого круга потребителей. Для достижения поставленной цели наиболее приемлемым является сравнительно-аналитический метод исследования, позволяющий достаточно широко и всесторонне изучить наметившуюся проблему и обозначить пути решения возникающих в сфере нового вида деятельности актуальных задач.

Взлёт новой проектной профессии во многом связан с её междисциплинарной природой, синхронно берущей начало в инженерно-техническом, цифровом и проектно-культурном полях. Техническая составляющая стала той иницирующей силой, которая постоянно подпитывает, трансформирует, совершенствует и обогащает проектно-художественную сферу светодизайна, захватывая всё новые области, меняя форматы и развивая художественные приёмы.

Божественная фраза «*Fiat Lux!*» (Да будет свет!) всегда будет незримо присутствовать в любом проектном действии, наполняя его сакральным мистицизмом. Сверхзадача, стоящая перед светодизайнерами, сближает их замысел с беспримерным актом Всевышнего. По слова Н.И. Щепеткова, «появление светодизайна и его развитие в индустриально развитых странах связано с достатком производимой электроэнергии, с прогрессом в осветительной технике и с постоянным повышением жизненных стандартов, среди которых зрительный комфорт, визуальная информативность и художественное совершенство создаваемой среды играют важную роль» [1].

Важнейшей задачей отрасли остаётся самоопределение профессии. Испытывая чувство ответственности за судьбу новой профессии, Д.Н. Макаров отмечает, что «... определить грань между функциональным освещением, спроектированным инженером-светотехником, и световым дизайном остаётся сложной, неоднозначной задачей... кто такой светодизайнер – это глубокое инженерное образование с добавлением архитектурного и/или дизайнерского или наоборот?» [2].

В полемику, определяющую границы термина «световой дизайн», вовлечены и объекты, созданные при помощи световых технологий, и произведения «светового искусства», и светодизайн функциональной направленности. Если отталкиваться от различных художественных и технологических факторов, то задача поиска единого определения профессии представляется почти что невыполнимой. Ряд авторов в определении светодизайна делает акцент на архитектурном генезисе профессии, изучающей «... взаимодействие света с окружающей средой и его влияние на визуальное восприятие, эмоции и самочувствие» [3], относя новую профессию к разделу «архитектурное освещение» и «световая архитектура». По мнению авторитетных специалистов (Н.М. Гусев и В.Г. Макаревич), «световая архитектура», мыслимая как диалог архитектуры и естественного и искусственного света [1], уступает место светодизайну, поддерживаемому сегодня такими участниками диалога, как, в частности, Н.И. Щепетков – основоположник современной отечественной световой урбанистики. Да и сама световая архитектура как раз-

дел светодизайна становится светоизлучающей, принципиально отличаясь от «дневной».

Ряд специалистов склоняется к главенству архитектурной составляющей в профессии, пользуясь определениями «световая архитектура», «архитектурная светотехника» и даже «светология» [4]. А. Ковшова, давая своё определение новой профессии, пишет: «... светодизайнер – «это «микс» профессий архитектора, инженера-светотехника и художника» [5]. Д.Н. Макаров, дополнив коллег, отмечает: «...это человек, который может рисовать светом, но при этом понимает, что представляют собой его «кисти»» [2], и одновременно – это «специалист, который ответственен за проектирование осветительной установки для ... среды, в которой длительное время присутствует человек», который действует в рамках архитектурного проекта, в тесном контакте и под руководством архитектора [2]. Все вышесказанное объединяет определение «современного мировоззрения на вопросы освещения» (А.Г. Хаджин [5]). И окончательную точку ставит мэтр светодизайна Н.И. Щепетков: «...в итоге «светодизайн – это всего-навсего образная составляющая архитектуры при искусственном свете. ... Он зародился, существует и развивается в лоне архитектуры, ... часть материальной и инженерной структуры архитектурного, инженерного или ландшафтного объекта. Принципиально неверно вырывать, вычленять светодизайн из архитектуры» (Н.И. Щепетков [6]).

2. Факторная модель профессии

Сегодня планета искусственного освещения покоится на «трёх китах» – трёх основных аспектах, базовых для «светодизайна» – это эстетическое восприятие, эргономическая составляющая, т.е. функциональность освещения, и энергоэффективность [7]. Светодизайн признан междисциплинарной специальностью, требующей фундаментального знания техники, архитектуры, истории, дизайна и культуры (В.П. Будак [5]). «Интегрируя в своей основе художественно-образную выразительность и композиционные приёмы искусства, эстетику функциональности, отличающую объекты дизайнера, а также новейшие научные и технические достижения в об-

ласти оптики и инженерии, светодизайн сегодня становится важнейшим элементом визуальной культуры» – не без основания констатирует Н.В. Быстранцева [8].

Наиболее близка авторам в качестве базового определения предлагаемая Ю.Б. Айзенбергом проектная составляющая «архитектурного освещения» или «светового дизайна», расположенная на стыке науки (светотехники), изобразительного искусства, инженерного творчества и архитектуры; «дизайнер – отнюдь не художник... «*design*» означает «проектирование», «конструирование», а «*lighting design*» – световое оформление¹» (Ю.Б. Айзенберг [6]). «Световой дизайн есть проектирование света или проектирование при помощи света», где бивалентность проявлена в приоритете то эстетической, то функциональной составляющей светового дизайна [9].

Профессия светодизайнера никак не обретёт необходимую устойчивость. За неполные два десятилетия нового столетия, ещё не успев полностью самоидентифицироваться, она уже разветвилась в разных направлениях, спеша захватить новые рубежи. Приоритет проектного подхода к разнобразному по появлениям формату светодизайна помог авторам выделить его наиболее значимые векторы развития.

Верер проектных стратегий в светодизайне оказывается напрямую связанным с кардинальной сменой самой парадигмы света в проектной культуре. Отсюда проистекают проблемы организации световой среды с помощью проектных решений, стоящие перед научным и практикующим сообществом. Свет призван быть инструментом формообразования и моделирования пространства в изобразительном искусстве, архитектуре и дизайне на уровне экспериментального и реального проектирования. Методическим подспорьем здесь выступает выверенный порядок процесса светового проектирования: от «светопластики», «светоформы» и «светопространства» (Н.И. Щепетков) до концепции проектирования световой панорамы города как крупномасштабного светосилуэтного компонента (В.Е. Карпенко).

¹ Обычно, как и отмечено ниже, под *lighting design* понимают, в первую очередь, проектирование освещения. – Прим. ред.

Современный потенциал световых технологий, способствующий рождению новых методов работы со «светоносной материей», основан на обширном спектре материализованных инноваций. Прежде всего – это изделия, созданные на основе энергосберегающих технологий (светильники со светодиодами). Однако своеобразие становления светодизайна в России в области энергосберегающих технологий отличалось «чрезвычайно низкой стоимостью электроэнергии, что создавало благоприятный фон для неэффективных решений на основе ламп накаливания, галогенных и люминесцентных ламп с примитивными светильниками...» [10], в отличие от стран Европы и США, где благодаря дороговизне электроэнергии и высокой конкуренции получили распространение программы энергосбережения, в которые прекрасно вписывалось светодиодное освещение. С 2011 г. стали появляться проекты, основанные на органических светодиодах – технологии бестеневых источников света (в частности – дисплеи из органических углеродных молекул), производство которых обходится в несколько раз дешевле производства светодиодов, и сами источники представляют собой новый простор для дизайнерской мысли [11].

Минимизация и экономичность энергопотребления сформировали раздел модной инновационной индустрии. «Интеграция технологических новшеств, включая светодизайн, с морфологией современного костюма, приёмы использования световозвращающих, светоотражающих тканей, светодиодов и т. п. технологические приёмы способствовали совершенствованию эстетических и эргономических качеств костюма: актуализируя тезис дизайнера постиндустриального общества «*форма следует за эмоцией*», и чисто эргономические аргументы, связанные с повышенной различимостью светящегося костюма в тёмное время суток» [12].

3. Смотры светового искусства

Площадки фестивалей и конкурсов становятся проводниками новейших тенденций в профессии. Наиболее целостную картину новейших проектных тенденций в области светодизайна представляют традиционные конкурсные программы: «Рос-

сийский светодизайн» и ряд других проектов. Фестиваль и смотр-конкурс «Световая архитектура», организованный Союзом московских архитекторов при поддержке Правительства Москвы и Комитета по архитектуре и градостроительству Москвы в 2015-ом Международном году света и световых технологий, в качестве научно-творческой платформы избрал тему архитектурного освещения и взаимодействия света и архитектуры на основе современных технических решений светодизайна. Большинство отмеченных современных профессиональных тенденций в области формообразования сформировалось именно благодаря появлению светодиодных технологий, которые обеспечили объектам компактность (минимализм светодиодного модуля) и гибкость конструкций, способных менять форму, и способствовали созданию принципиально нового источника света с соответствующим потенциалом декоративного освещения (приоритет осветительного элемента, световой «формы»).

По мнению экспертов конкурса, потенциал света как объекта и предмета проектирования включил в себя целый ряд параметров:

- экологичность;
- интеграции света в различные поверхности объектов дизайна и архитектуры;
- отношение к свету как к материалу: вновь создаваемые строительные и отделочные материалы уже сами являются источниками света;
- регулирование светового потока и цветности излучения, температурные настройки, динамика спектра и интенсивности света, управленческие эмоции;
- возможность управления осветительными приборами по сценариям с помощью различных технических устройств, в т. ч. работающих удалённо [13].

4. Концептуальный подход к светодизайну

Проектные подходы в светодизайне всё чаще опираются на концепции, расчищающие путь к новым решениям. Постепенное усложнение целей проектирования световой среды потребовало более убедительной проработки художественной и содержательной составляющих любого объекта.

За последние пять лет на международном рынке значительно возросли требования к проектам: теперь заказчиков привлекает «комплексность» решений. «Уже недостаточно просто создать проект освещения, теперь необходимо продумать его интеграцию в городскую среду, а также сценарий создаваемого пространства» [14]. Эпоха световых сценариев свидетельствует о раскрепощении профессии, говорит о переходе к эмоционально захватывающим, театрализованным по своей природе световым проектам.

Увлечение сценарностью ознаменовало переход от «смыслового архитектурного освещения (светового дизайна) к световому развлекательному дизайну, коммерческому, рекламному» (Ю.Б. Айзенберг [6]). Зрелищная среда мероприятий выступила катализатором развития одного из направлений светодизайна, связанного с шоу-индустрией, музейно-выставочных пространств, городских праздников и т.д. Мультимедийные разработки световых сценариев эпохи цифровых технологий и по сей день остаются экспериментальной областью работы со светом как с формой, активно плодя новые формы светопрезентаций. Видео-мэппинг, основанный на 2D и 3D проекциях (экраном выступает архитектурное сооружение, природные объекты, водяной туман, водопад и т.п.), лазерные инсталляции, голографические скульптуры, арт-объекты на основе цветоцветовой динамики и т.д. Свет становится частью игры режиссёра со зрителем, средством коммуникации и ориентации. Для каждой формы досуга можно подобрать свой удобный сценарий. Хотя сценарность уместна везде, даже в ванной... [15].

5. Цифровизация светодизайна

Сценарность добавила динамику в восприятие первоначально статичной «световой архитектуры». Поиски формообразующего потенциала света на кинетической основе в недрах художественной практики, начатые дизайнерами эпохи авангарда, продолжались на протяжении всего XX столетия и вылились в эксперименты со светом на основе новейших цифровых методов. Широкая область световых медиа-объектов обретает реальные контуры в творческом диалоге инженерной, режиссёрской и художественной составляющих, динамично

актуализирующих технические новинки медиа и световой индустрии. Эту сверкающую планету возможно обозначить термином «интеллектуальный свет».

Совершенствование программных продуктов открывает возможности создания интерактивных объектов, где человек оказывается встроенным в диалог с «умным» источником света. Вот несколько примеров. Технология *iBar* представляет собой интеллектуальную поверхность барной стойки с интегрированным видео-проектором, интеллектуальной системой слежения за объектами для динамического взаимодействия с движениями на стойке, подсвеченные или виртуальные сенсорные объекты и т.д. Технология интеллектуального света *Light ID (Panasonic)*, позволяющая считывать информацию с любого предмета, освещённого светодиодным источником света, была использована ГМИИ им. А.С. Пушкина в Москве. Специально разработанное мобильное приложение для смартфона включает информационную базу об экспонатах на любом языке.

Проект «умный город» открывает широкие перспективы для совершенствования «интеллектуального света». «В разработанном Минстроем России октябре 2018 г. стандарте умного города, среди критериев отнесения городов в разряд «умных» указывается модернизация городского и внутреннего освещения; на технологическом уровне умный город делает комплексная многоуровневая система ... Первой крупнейшей отечественной разработкой с масштабным применением цифрового контента технологий умного города стал проект «Светлый город» (Иваново)» [16]. Инновационные технологии светового дизайна с компьютеризированной системой подсветки были применены к известным архитектурным объектам г. Ростова-на-Дону.

Развитие интерактивных, мультимедийных световых моделей и выбор грамотного проектного решения требуют разработки новой более совершенной **программно-технологической поддержки** (ИТ и медиа-технологии). В комментарии к конкурсному заданию на лучшую концепцию решения наружного фасада Главного штаба на Дворцовой площади в Санкт-Петербурге, В.П. Будак отмечает, что в качестве средств

ва моделирования проекта программы класса *DIALux* требуют замены на программы *Lightscape* и ей подобные» [17].

Несмотря на важность инженерно-технической составляющей профессии, приоритет творческого импульса, по словам голландского светодизайнера Р. ван дер Хейде, сохраняется. «Вы должны открывать новые методики освещения, разбираться в оптических свойствах солнца, искусственных источников света, чтобы находить новые решения. Также никогда не отвергайте хорошие идеи, если кажется, что для них нет подходящих технологий. Просто иногда необходимо эти технологии поискать» [14].

6. Светодизайн как искусство

Признание света инструментом художественного формообразования выводит светодизайн на уровень подлинного искусства. По мысли Дж. Нельсона, «когда речь идёт о создании произведения искусства, *технические усовершенствования*, в процессе ли обработки или в материалах, не имеют ровно никакого влияния на конечную цель» (Ю.В. Назаров [5]). Технологический прорыв в светодизайне позволил создать новые жанры искусства в формате мультимедиа. Видео-мэппинг – направление аудиовизуального искусства, использующее визуальные иллюзии, проецируемые на различные поверхности. Световой Театр «*LUX AETERNA*» (основан в 1982 г.) функционирует на основе уникальных световых технологий, где с помощью световой кисти и лазеров при полном отсутствии актёров создаётся светомузыкальное шоу, по масштабу сопоставимое с безграничными просторами космоса. Свои светомузыкальные образы, обращённые к чувственному восприятию зрителя, режиссёр Даниил Фридман основывал на идее композитора Александра Скрябина о цветовом восприятии музыки.

В основе экспериментальных поисков светодизайнеров, связанных с техническими ноу-хау, лежит эмоциональная природа световых образов, что и позволяет им быть причисленными к области художественного творчества. «Эмоциональный дизайн» занимает в теории А. Уолтера (подобно пирамиде потребностей Маслоу) своё законное «надстроечное» место:

«продукт должен быть функциональным, надёжным и удобным, прежде чем он сможет доставлять удовольствие» [18]. Согласно теории «эмоционального дизайна» в интерпретации отечественного светодизайнера С. Сизого, любая световая среда создаётся не только для выполнения необходимых функций, но и с учётом чувственного опыта пользователей, близких им эмоций и подходящего по контексту настроения [19]. Эмоционально-художественный аспект открывает широкое поле для авторских версий светодизайна.

В 2017 г. в своей лекции «Бетон, сталь, свет и эмоции» светодизайнер Д. Скира (основатель студии *Skira*) заявил, что «заказчиков привлекает комплексность решений, уже недостаточно просто создать проект освещения, необходимо продумать его интеграцию в городскую среду, а также сценарий создаваемого пространства» [14]. Эмоциональный настрой освещения становится частью комплексных проектных решений в светодизайне на одном уровне с функциональными требованиями рабочих процессов, выступая мотивирующим фактором.

С концепцией эмоционального дизайна тесно связана и авторская версия стилизаций в светодизайне. Приёмы формообразования в дизайне светильников коллекции *Radio Lamp* основаны на подходах конструктивизма, трансформации формы башни Шухова в Москве. Дизайнер О. Подольская работает над светильниками, использующими стилизованные реминисценции спилю «сталинских» высоток. Стилизации образов природы, поддержанные высоким технологическим уровнем, открывают «бионическое направление» светодизайна, «позволяющее создание сложных бионических форм» [13].

Усиление социального статуса светодизайна, повышение его роли в организации общественного интерьерного и городского пространства превращают проектировщика в субъекта новой культурной традиции. Творческое пространство светодизайна становится полем для решения актуальных задач современного социума.

Праздничная городская среда является примером использования различных световых сценариев. Новогодние представления последних лет дали примеры арт-объектов, символизирующих рождественские ели, рождест-

венские ярмарки, дали примеры новогодних иллюминаций на знаковых архитектурных и инженерных объектах (Эйфелева башня), подсвечивания ледовых скульптур. В Москве стал традицией ежегодный фестиваль «Рождественский свет». Крупные города – Москва, Санкт-Петербург, Екатеринбург – разрабатывают специальные программы по созданию архитектурной подсветки под девизом «Светлый город».

Создание новых поведенческих сценариев, вошедших в городскую культуру, содействуют активному образу жизни. Популярный онлайн журнал «*4living*» приводит пример Швеции, где программируемая интерактивная световая инсталляция решила сразу несколько задач: освещение тёмного района устранило проблемные места частого нападения на велосипедистов, а создание световой доминанты помогло хулиганам стать почитателями стрит-арта, причём одновременно возросла популярность вечерних пробежек и велопрогулок горожан. Интерактивные элементы костюма формируют новые культурные установки: дополнительные функции стимулируют жизнь в движении, поскольку активизация встроенных «гаджетов» часто напрямую зависит от физической и социальной активности их владельца. «Будучи незаменимым средством художественной выразительности в... пространственных, временных и пространственно-временных искусствах, свет потенциально является носителем ряда свойств, ... как живописность, архитектурность, графичность, сценарность и т.д. Тем самым он может быть рассмотрен в качестве феномена культуры, в котором со всей силой проявляется диалектическое противоречие между дизайном как пониманием/конструированием окружающего человека предметного и социального мира, и «высоким» искусством как художественно-образным осмыслением/освоением действительности» [9].

Феномен света, наполненный социокультурными смыслами, получил отражение в материалах конференции «Световой дизайн – 2015. Световая культура». Программа докладов открылась выступлением Н.И. Щепеткова (МАрХИ (ГА)), который тематически обозначил основной лейтмотив конференции – «Светодизайн и световая культура» [20]. Светодизайн обрёл

своё место в информационно-культурном пространстве Интернета. На основе проекта портала *LightOnline.ru* 2004 года, в 2009 году появился портал <http://lightonline.ru/svet>, лицом которого выступает команда профессионалов-светотехников, имеющих многолетний опыт работы на светотехническом рынке России.

7. Светодизайн и светотехника — диалектика взаимосвязи

Светодизайн уже с первых десятилетий XX в. обрёл прочную теоретическую базу в светотехнике. Однако научные амбиции профессии с течением времени оказались гораздо шире. Научная составляющая профессии совершенствовалась, постепенно наполняясь знанием смежных дисциплин: архитектуры, искусствоведения и т.д.

Часть авторов лишают проектно-художественную составляющую профессии научного основания. «Утилитарная сущность светодизайна – удел науки, а художественная – как сверхзадача нового искусства» [21]. Некоторые авторы сводят понятия «светодизайнер» и «светотехника» к одному знаменателю, где «первое подразумевает переход на международный светотехнический язык, а второе – на региональный» [2]. По мнению Ю.Б. Айзенберга, «рассматриваемое направление деятельности ни в коей мере не базируется ни на каком научном фундаменте, кроме тех законов, на которых зиждется наука «светотехника», а потому и не может называться самостоятельной наукой. ... «архитектурное освещение» («световой дизайн») ... находится на стыке двух интересных и важных наук: науки о свете и его применении и науки «архитектура»» (Ю.Б. Айзенберг [6]). Приоритет научной базы архитектуры для светодизайна подтверждается определением «светодизайна – [как] ... её нового раздела ... светодизайнер должен знать основы светотехники и архитектуры. Светотехника изучает не только физические законы оптического излучения, но и психофизиологические основы зрительного восприятия света человеком. А на зрительных оценках, невозможных без света, зиждется почти вся оценочная база архитектуры как выразительного искусства в её теории и практике. Светодизайн попадает в «самое яблоч-

ко» синтеза этих научных дисциплин и их практического применения» [21].

Эпоха цифрового проектирования дополнила светодизайн новыми теоретическими достижениями компьютерного моделирования. Это открывает перспективы исследований не только в области технической эстетики, но и в смежной с дизайном области физиологии зрения, новых энергосберегающих технологий и т. д. Открывается потребность целостной инфраструктуры теоретической базы дисциплины – «технические комитеты, конференции, профессиональные сообщества и научные центры, которые дали и власти и бизнесу информацию для принятия правильных, научно и технически обоснованных решений» [10].

Частью этой инфраструктуры, кроме фундаментальных исследований, стали ежегодные международные научно-практические конференции «Световой дизайн» (2014–2015 гг.). Среди актуальных вопросов, предложенных конференциями к обсуждению: теория цвета, свет и искусство, светодизайн и наука, раскрытие междисциплинарного потенциала светового дизайна, рассмотрение практики и перспектив взаимодействия научной, художественной и технической составляющих в области светового дизайна.

Перспективными для научных дискуссий становятся возможности Интернета, уничтожая географические границы и иные барьеры. Первая международная онлайн-конференция по светодизайну «Светлые мысли 2016» собрала лучших отечественных и зарубежных специалистов на одной онлайн-площадке.

Ход профессиональной дискуссии, посвящённой проектно-теоретической ситуации в современном светоди-

зайне, развернувшейся на страницах профессионального журнала «Светотехника» в 2018 г., выявил наиболее острые проблемы, отмеченные профессиональным сообществом. И, пожалуй, камертоном всех выступлений прозвучал вопрос о собственно художественной стратегии светодизайна: о критериях, проектных принципах, уровне диалога с технико-технологическими параметрами и т.д.

«У «светового дизайна» есть реальные перспективы стать самостоятельной специальностью... Беда лишь в том, что катастрофически отстаёт научно-теоретическая база этой деятельности» [1]. Ситуация нестабильности научного аппарата профессии, о чём свидетельствует путаница в базовой терминологии, говорит об отсутствии единой системы критериев оценки проектов светодизайна, не только с объективной светотехнической стороны (они уже существуют), но и точки зрения художественно-эстетической. «Свет, являющийся четвёртым измерением архитектуры, гораздо сложнее, чем просто освещённость, рассчитанная в соответствии с нормами и правилами» [2]. Последние исследования в сфере дисциплины «Техническая эстетика и дизайн», посвящённые теории светодизайна, находятся только в стадии наработки научного потенциала. До сих пор в России нет ни одного специалиста, который бы продвинулся в вопросах эстетики освещения и понимания психологического и физиологического воздействия света дальше, чем А.Б. Матвеев² и Г.В. Каменская³. Поднятые этими авторами вопросы остаются до сих пор не решёнными. Более того, они накапливаются на фоне «дефицита количества актуальных научных обоснований» (Н.В. Быстрянцева [5]).

² Матвеев Александр Борисович – доктор технических наук, действительный член Российской Академии Электротехнических наук, профессор кафедры светотехники ФГБОУ ВО «НИУ «МЭИ». Годы жизни 2.01.1926–22.01.2008. Его работа «Теоретические и экспериментальные исследования метрики цветосветовой среды в светотехнике» и в настоящее время представляет собой целый кладезь новых идей и направлений исследований в светотехнике.

³ Каменская Галина Васильевна – кандидат технических наук. Заведующая лабораторией электроосвещения в ЦНИИЭП инженерного оборудования жилых и общественных зданий. Годы жизни 5.10.1934–9.01.2018. Разработчик светового оборудования в области театрального освещения в Экспериментальной сценической лаборатории МХАТ им. А.П. Чехова. Автор уникальной установки плоскостного моделирования освещения улиц и архитектурных сооружений и методики проектирования архитектурного освещения. Результаты её экспериментальных исследований уличного и архитектурного освещения вошли в нормативные документы и ведомственные инструкции по проектированию электрооборудования общественных зданий и были положены в основу нормирования наружного архитектурного освещения.

8. Подготовка специалистов

Любая профессия начинается с образования. Опыт западных мировых школ светодизайна насчитывает несколько десятков поколений светодизайнеров. Отечественная школа образования, включая высшее, составляет всего пару десятилетий активных поисков, но при этом уже накоплен определённый методический опыт. Портрет специалиста, прежде всего, разрешает вопрос взаимоотношения искусства, науки и технологии с учётом многоуровневой природы светового дизайна. Идёт ли речь о формировании языка профессии светодизайнера, либо о программе подготовки будущего специалиста, – в любом случае однозначно признание их междисциплинарной структуры. «Сочетание деталей науки и искусства» (П.А. Смирнов) [6], «диалога визуализации, реализации проекта освещения и набора математических данных, кривых количественных характеристик» [2], «интегративный» характер, где интер-дисциплинарный и комплексный подход сочетает методы как логического анализа, так и интуитивного (Н.В. Быстрянцева) [5].

Вопрос подготовки специалистов по световому дизайну стал частью научной дискуссии в программах Первой Всероссийской научно-практической конференции: «Световой дизайн – 2014» и Международной научно-практической конференции «Световой дизайн – 2015». Участники подтвердили научную, художественную и техническую составляющие образовательных методик, особое внимание было привлечено к развитию экспериментальных методик обучения. Каждая школа, со своими традициями и опытом, продемонстрировала свой «оттенок» и подчёркивала особую грань световой культуры. Среди них: МАрхИ (ГА), НИУ «МЭИ», Высшая школа светового дизайна Университета ИТМО, СПбГХПА им. А.Л. Штиглица, ИДИ СПГУТД, СПбГУКиТ и т.д. Рассматривая перспективы образования в МАрхИ, проф. Н.И. Щепетков видит «доминирующей архитектурно-художественную подготовку, а светотехническую – сопутствующей, но не менее фундаментальной, на основе компьютерных технологий проектирования» (Н.И. Щепетков [6]). Новый подход на кафедре светотехники

НИУ МЭИ «предлагает методику обучения проектированию ОУ с использованием программ компьютерной графики, которая одновременно формирует эстетические вкусы проектировщика» [22]. Тем самым, учебные заведения вносят гуманитарную составляющую, свойственную архитектуре и дизайну, в новую дисциплину «светодизайн».

Примером методологии комплексной образовательной подготовки конкурентоспособных, направленных на решение проблемно-ориентированных задач профессионалов (*Problem Based Learning*) выступила стратегия Высшей школы светового дизайна Университета ИТМО (руководитель Н.В. Быстрянцева). Здесь подразумевается участие в учебном процессе специалистов различных профессий – маркетологов, архитекторов, культурологов, художников, дизайнеров, урбанистов, специалистов в области ИТ, экспертов в области здравоохранения, робототехники и современной инженерии (Н.В. Быстрянцева [5]).

Перспективные тенденции заложены в методиках образовательных школ светодизайна, оказавшихся более приспособленными к быстрой смене приоритетов в профессии. Пример первой в России школы светодизайна *LiDS* под руководством С. Сизого даёт опыт единой универсальной методики в проектировании свето-пространственной среды на основе чувственного восприятия, учёта эмоций и настроения реципиента. В основу данной методики легла теория эмоционального дизайна С. Сизого, в которой получили практическое развитие и теоретическое обоснование идеи Н.М. Гусева о световом формировании интерьера с учётом ассоциаций, выработанных у нас природой [2].

Школа базируется на экспериментальной основе со своей теоретической платформой, которая входит в обязательную часть обучения. Курс «Психология освещения», экспериментирующий с цветным светом в восприятии человека, позволяет использовать этот приём в проектах. Экспериментом стали курсы, включающие смежные к светодизайну области: «Светотерапия и биологическое воздействие света на человека» (автор д.м.н. К. Даниленко). Ряд разработок не имеет аналогов: курс «Скетч для дизайнеров», пакет прикладных компьютерных программ *LighCAD*,

который разрабатывается компанией *intiLED* [23].

Опыт Школы *LiDS*, отмеченный тесной связью образовательных методик с международными тенденциями, переосмыслением мирового опыта преподавания светодизайна в США, Англии и Германии, включением в программу выездных курсов в различные города Европы, несомненно, является положительным примером. Новые формы обучения, введённые в Школе, – вебинары, дублирование интенсивов в формате онлайн-курсов, видеотека презентаций о светодизайне, облегчают получение информации вне зависимости от удалённости слушателя.

Более частные (узкие) вопросы методик в профессиональном образовании получают решение на уровне различных интенсивов, не претендующих стать полем серьёзных исследований. Центр *Artplay* обучает использовать свет не только в качестве функционального инструмента, но и как средство управления собственными эмоциями [24].

Вопросы образования находят решение в рамках нового для России формата междисциплинарных платформ. Спецпроект «ПРОЕКТ СВЕТ» (куратор спецпроекта Э. Лобацкая) сфокусирован на теории и практике светового дизайна. Помимо экспозиционной деятельности, дискуссий, воркшопов и периодического издания он включает в себя образовательные программы. В качестве основной задачи платформы выдвигается содействие становлению школы отечественного светового дизайна и профессионализации рынка световых решений.

В итоге, создание методологии профильного образования включает в себя работу по трём основным направлениям:

- теория светового дизайна (по словам Н.В. Быстрянцева [5], за период с 2006 г. не издано ни одного учебника);

- перевод учебного процесса на междисциплинарную основу;

- развитие партнёрства между ведущими отечественными (в будущем – международными) высшими школами в области образовательных программ, исследовательской и проектной деятельности, программ повышения квалификации. Современный специалист должен обладать знаниями и навыка-

ми «комплексного светового дизайна» [20].

Показателем жизнеспособности подготовленных профессионалов становится их участие в серьёзных международных научно-практических исследованиях, подобно участию Высшей школы светового дизайна Университета ИТМО в проекте *Strategic Partnership* по теме междисциплинарного (на стыке фотоники, ИТ, светового дизайна, архитектуры и дизайна среды) характера *LIGHT FOR HEALTH*.

9. Заключение

Стратегию развития светодизайна как профессии в нашей стране можно определить, прежде всего, через создание школы отечественного светодизайна как определяющего направления деятельности. Её слагаемые одновременно становятся и базовыми принципами, и отличительными свойствами, позволяющими этому живому организму существовать и развиваться. Школа становится открытой системой, чутко реагирующей на быстроту изменений внутри профессии, со своими параметрами «творческой лаборатории», где происходит генерирование идей, зарождающихся на стыке науки, искусства и техники; интеграционная природа светодизайна предполагает создание новых оснований для совместного развития и взаимообогащения технического и художественного потенциалов, закладывая фундамент культуры XXI в. [8]. Рамки школы готовы объединить на своей платформе все инновационные тенденции развивающейся профессии. Единое основание школы поможет свести в единое русло пока разрозненные начинания, тем самым усилив результативность каждого.

Комплексность подхода и междисциплинарные перспективы развития светодизайна из красивых слов начинают обретать зримые очертания и за рамками эстетики привычной архитектурной среды. Развитие профессии должно происходить с учётом «многоуровневой» природы светового дизайна (научный, художественно-эстетический, технологический, социокультурный, экологический и др. аспекты). Новый формат светодизайна, оперирующий психофизическими характеристиками цвета (цветотерапия), представляет собой лечение энергией цветных потоков света. Эмоциональ-

ная сторона цветотерапии используется в целях решения задач физиологии для здорового сна, снятия психологического стресса и т.д. Введение цветотерапии как отдельной отрасли, предположительно, способно помочь «особенным» детям и взрослым [25]. Открытия в «светопсихологии» становятся достоянием проектной практики с учётом функций среды: «привлечь внимание можно с помощью контрастного, интенсивного света. Тёплый свет создаёт уют в квартире, холодный – стимулирует активность, и ... более предпочтителен в офисе» [15]. На периферии профессии возникают новые гибридные профессиональные структуры, способные выделиться в самостоятельные направления деятельности. «... Развитие темы «Световая экология» мы видим в двух направлениях: среда, оказывающая воздействие на человека, и человек как центр организации среды» (Н.В. Быстрянцева [5]). Разрастание полидисциплинарной структуры должно быть стабилизировано научно-обоснованными критериями оценки создаваемого в итоге «продукта», будь то материализованный проект, услуга и т.д.

Как открытая система, школа светодизайна становится свободным для профессиональных обсуждений пространством. Дискуссии в форматах конференций, публикации в периодической печати, проведение круглых столов и т.д. станут залогом максимальной объективности при выборе критериев оценки деятельности светодизайнера по самоидентификации профессии: её идеологии, философии и эстетики, проектной и образовательной методологии.

Для «легального становления светодизайна» (Ю.Б. Айзенберг [6]) необходимы конкретные и реальные тактические шаги, в качестве которых может выступить основание светотехнической ассоциации. Рассматриваемая как область социальной активности школы светодизайна, эта ассоциация может быть некоммерческим профессиональным сообществом, «союзом российских светодизайнеров», подобно «союзу дизайнеров», отмеченным «корпоративной независимостью, конструктивным сотрудничеством ведущих предприятий отрасли, корпоративным и личным членством, взаимодействием с государственными структурами» [10], с обязательным формулированием «критериев

членства в подобной ассоциации» [2]. Создание подобной ассоциации будет способствовать «официальной регистрации профессии», подводя к следующему необходимому этапу – «введению системы оценки специализации и квалификации практикующих светодизайнеров ... профессиональным сообществом» (А.Г. Приходько [5]). Этим шагом профессиональной самоидентификации светодизайнера в рамках школы становится формулирование его компетенций, которые ещё нуждаются в уточнении, также предстоит серьёзная разработка-доработка «Стандарта профессии» [21].

При всей важности перечисленных выше критериев светодизайн должен оставаться искусством. Ключевым свойством любого проектирующего специалиста, включая светодизайнера, по мнению Ю.В. Назарова, «является наличие творческого воображения. Без этого ключевого компонента никакие технические, экономические и деловые навыки не позволят создать оригинальное и привлекательное произведение дизайнера, в том числе и в области светодизайна! Каждый талантливый дизайнер конструирует свою собственную модель профессии, и в этом залог неповторимости и разнообразия появляющихся проектно-художественных решений» (Ю.В. Назаров [5]). По словам основоположника городской световой архитектуры проф. Н.И. Щепеткова, сегодняшние светодизайнеры всё ещё остаются «самоучками», птицами «с одним крылом», пришедшими в профессию из архитектуры, светотехники, смежных специальностей, областей, так и остающихся приоритетными в части полученного фундаментального образования. Исправить сложившуюся ситуацию сможет только переход будущего отечественного светодизайна в руки настоящих профессионалов.

ССЫЛКИ НА ЛИТЕРАТУРУ

1. Щепетков Н.И. Светодизайн и архитектура – перспективы взаимодействия // М.: МАРХИ. <http://lightonline.ru/svet/articles/LightDesignArchi09.html>
2. Макаров Д.Н. Световой дизайн. Современное состояние // Светотехника.– 2018.– № 3. – С. 78–82.
3. <https://designbd.ru/article/tendencii-razvitiya-svetodizayna/>
4. Сизый С.Н. Современное состояние и перспективы развития светодизайна // Светотехника.– 2018.– № 3. – С. 72–78.

5. Назаров Ю.В., Овчаров, А.Т., Ковторова А., Быстрянцева Н.В., Ковинова А., Новаковский Л.Г., Хаджин А.Г., Приходько А.Г. Продолжение дискуссии по проблеме светового дизайна, начатой в № 3 // Светотехника.– 2018.– № 4. – С. 80–93.

6. Айзенберг Ю.Б., Матовников Г., Смирнов П.А., Щепетков Н.И. Продолжение дискуссии по проблеме светового дизайна, начатой в № 3 и продолженной в № 4 // Светотехника.– 2018.– № 4. – С. 79–85.

7. Булыгина М.Н., Корзун Н.Л. Световой дизайн в городской среде // Известия вузов. Инвестиции. Строительство. Недвижимость.– 2013. – Том 5, № 2. – С. 64–79. <https://cyberleninka.ru/article/n/svetovoy-dizayn-v-gorodskoy-srede>

8. Быстрянцева Н.В., Лекус Е.И., Матвеев Н.В. Школа отечественного светодизайна: стратегии и тактики // Светотехника.– 2015.– № 4. – С. 66–67.

9. Лекус Е.Ю., Быстрянцева Н.В. Световой дизайн: свет как материал, технология, форма. Коллективная монография // Материалы международной научной конференции «Материал-технология-форма как универсальная триада в дизайне, архитектуре, изобразительном и декоративном искусстве». МГХПА им. С.Г. Строганова, 2018. – С. 447–451.

10. Долин Е.В. Стратегические проблемы светотехнической отрасли с точки зрения внедрения инноваций // Светотехника.– 2009.– № 4. – С. 74–75. http://lightonline.ru/svet/articles/LED_Forum_Problems.html

11. <http://swetotehnika.ru/proizvoditeli-svetotekhniki/zeon/>

12. Васильева Т. Влияние новых технологий на формообразование в дизайне одежды. Дисс. на соиск. уч. степени канд. иск. 17.00.06. М.: ВНИИТЭ, 2011.– 193 с.

<http://www.dissercat.com/content/vliyanie-novyykh-tekhnologii-na-formoobrazovanie-v-dizaine-odezhdy>

13. Тюрин М.Ю., Рябикова Л.А. Современные тенденции в светодизайне. Наука ЮУрГУ. Материалы 62-й научной конференции Секции социально-гуманитарных наук / М-во образования и науки Российской Федерации, Южно-Уральский гос. ун-т. – Челябинск: Изд. центр ЮУрГУ, 2010. – С. 120–124. <http://dspace.susu.ru/xmlui/bitstream/handle/0001.74/5451/20.pdf?sequence=1>

14. <http://news.ifmo.ru/ru/news/6962/>.

15. Целев К. Переходите на светлую сторону! // Интернет-журнал о дизайне и архитектуре BERLOGOS. 2016. <http://www.berlogos.ru/interview/perehodite-na-svetluyustoronu/>

16. Тимофеева Н. Умный город Иванова // Современная светотехника.– 2018.– № 6. – С. 2–4.

17. http://lightonline.ru/svet/articles/Interview_Budak_about_tender.html.

18. Астрашевский С. Эмоциональный дизайн. The Personality Layer. <http://analyst.by/articles/emotional-design>.

19. www.altie.ru/events/413-svetliymisli-2016.html.

20. <http://ruld.ru/encyclopedia/articles/itogikonferentsii-svetovoi-dizain-2015-svetovayakultura>.

21. Щепетков Н.И., Будак В.П. Итоги дискуссии по проблеме светодизайна. Резюме редакции // Светотехника.– 2018.– № 6. – С. 94–96.

22. Будак В.П., Ковыркина М.Д., Макаров Д.Н., Минаева С.Ю., Скорнякова А.А. Светодизайн – воспитание творческих способностей у студентов – светотехников // Светотехника.– 2019.– № 1. – С. 80–83.

23. Интервью с основателем школы светодизайна LiDS Сергеем Сизым // Современная светотехника.– 2015.– № 6. – С. 52–57.

24. <http://dizbook.com/news/education/432-kak-priruchit-svet-intensiv-po-sve>.

25. Пахомова А.В. Цветотерапия как новая отрасль светодизайна // Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС». <http://dngng.pstu.ru/conf2017/papers/84/>



Заява-Бурдонская Елена Анатольевна, кандидат

искусствоведения, профессор. Окончила в 1987 г. Московское высшее художественно-промышленное училище (б.

Строгановское). И.о. зав. кафедрой Средовой дизайн МГХПА им. С.Г. Строганова, член Союза дизайнеров России, член «Союза Художников России». Лауреат премии Москвы



Назаров Юрий Владимирович,

доктор искусствоведения, профессор. Окончил в 1972 г.

Московское высшее художественно-промышленное училище (б. Строгановское). Ректор НОУ

«Национальный институт дизайна». Член-корр. Российской Академии художеств. Почётный Президент Союза дизайнеров России. Лауреат Государственной премии РФ. Заслуженный деятель искусств РФ

МЕЖДУНАРОДНЫЕ КОНФЕРЕНЦИИ И ВЫСТАВКИ В 2019 ГОДУ (IV квартал)

Дата	Название мероприятия	Место проведения
01–04.10	Энергосбережение и энергоэффективность. Инновационные технологии и оборудование – 2019 1-я Международная специализированная выставка	Санкт-Петербург, РФ exponet.ru
03–05.10	IALD Enlighten Americas: Light Eclectic Международная конференция по светодизайну и смежным вопросам, организуемая Международной ассоциацией светодизайнеров	Альбукерке, Нью-Мексико, США lightsearch.com
23–26.10	PLDC – Professional Lighting Design Convention 8-я Международная конференция по профессиональному осветительному оборудованию и светодизайну, с выставкой	Роттердам, Нидерланды lightsearch.com
27–30.10	Hong Kong International Lighting Fair Международная светотехническая выставка, организуемая Торговым советом Гонконга. Крупнейшая выставка такого рода в Азии и вторая по величине в мире	Гонконг (Ванчай), КНР lightsearch.com
Ноябрь. Дни будут объявлены	IALD Enlighten Europe Международная конференция по светодизайну и смежным вопросам, организуемая Международной ассоциацией светодизайнеров	Барселона, Испания lightsearch.com
13–15.11	Российский промышленник – 2019 Международный промышленный форум	Санкт-Петербург, РФ exponet.ru
29.11– 01.12	LUMI – Illuminotronics 2019 Международная выставка-ярмарка по освещению светодиодами и электронике, интернету вещей и автоматизации зданий, с конференцией и воркшопами	Болонья, Италия lightsearch.com worldexpo.pro



Международная
светотехническая
корпорация



БООС ЛАЙТИНГ ГРУПП

Лидер светотехнической отрасли России



- Проектирование и дизайн
- Разработка и конструирование световых приборов
- Разработка программного обеспечения
- Производство
- Строительно-монтажные и пусконаладочные работы
- Управление освещением
- Эксплуатационное обслуживание
- Сбыт световых приборов и металлоконструкций



Россия, г. Москва,
проспект Мира, д. 106



bl-g.ru



+7 (485) 785-37-40

Исследование яркостных характеристик объектов с архитектурным освещением на центральных улицах города Тулы

С.В. КОЛГУШКИНА¹, Н.В. БЫСТРЯНЦЕВА, В.Т. ПРОКОПЕНКО

Университет ИТМО, Санкт-Петербург

¹ E-mail: svkolgushkina@corp.ifmo.ru, kolgushkinasv@gmail.com

Аннотация

Исследование распределения яркости по фасадам с реализованным архитектурным освещением позволяет объективно оценить условия восприятия архитектурных объектов, проанализировать качество светового решения. Актуальность оценки яркостных характеристик в условиях ночного города возрастает с каждым годом, в частности, для городов, где вектор развития световой среды направлен на количественное увеличение освещённых объектов и отсутствует заранее разработанная стратегия развития световой среды. На примере 11-ти центральных улиц г. Тулы рассмотрен комплексный подход к анализу качества архитектурного освещения. С помощью фотояркомера оценены яркостные характеристики фасадов.

Ключевые слова: архитектурное освещение, распределение яркости, световая среда, измерения яркости, качество освещения.

1. Введение

Формирование световой среды городов в настоящее время происходит в России стихийно, без учёта иерархии объектов в городской среде [1–3]. Яркостные характеристики реализованных осветительных установок часто завышены, что отрицательно сказывается на зрительном восприятии [1–3]. Увеличение количества решений архитектурного освещения на базе локального освещения приводит к визуальному разрушению целостности восприятия объёмов зданий, а соотношения минимальной и максимальной освещённости в большинстве случаев не соответствуют требованиям СП 52.13330.2016 и превышают 1:30 [4].

Световая композиция вечернего города должна основываться на соответствии в общем решении всех элемен-

тов световой среды. К архитектурному освещению предъявляют следующие требования: идентификация объёмно-пространственной структуры, выразительность тектоники и пластичность архитектурных форм, причём наружное архитектурное освещение должно быть частью общего городского дизай-

на и световых панорам вечернего города [1–4].

С позиции качественной оценки реализованных световых решений в современной действительности существуют следующие проблемы:

- формирование облика ночных городов без разработанной стратегии освещения приводит к появлению в России разрозненных объектов;
- не учитывается градостроительная иерархия объектов в городской среде;
- реализованные объекты не соответствуют по уровню яркости требованиям нормативных документов;
- отсутствуют механизмы контроля качества реализованных объектов.

Недостаточное внимание к указанным проблемам приводит к разруше-

Рис. 1. Нанесённые на карту объекты с архитектурным освещением

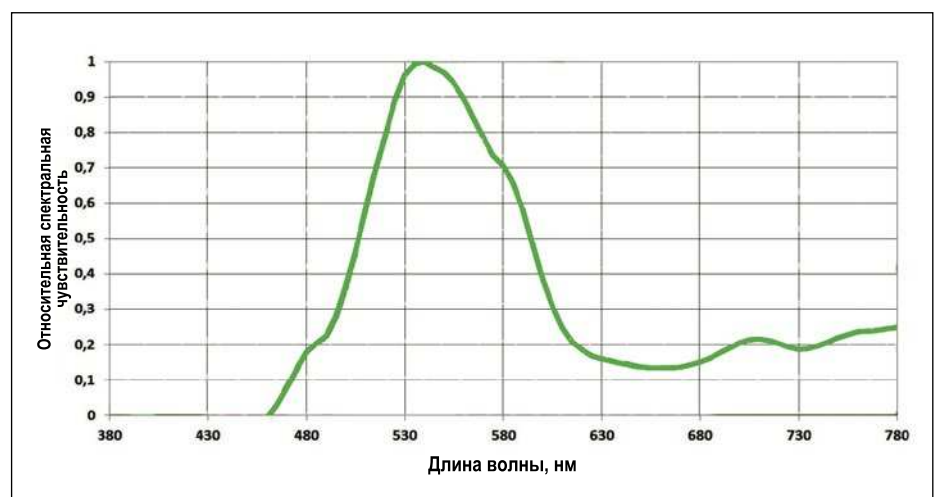
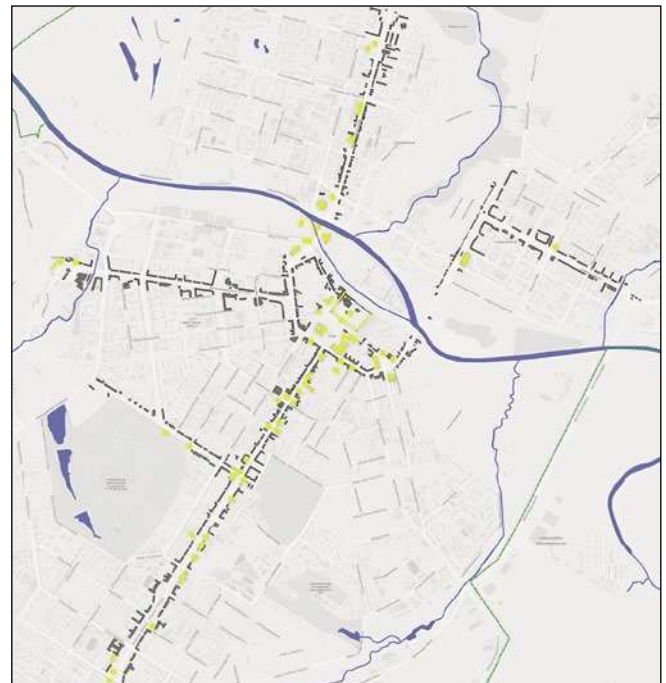


Рис. 2. Относительная спектральная чувствительность фотояркомера

улица Мосина, 2			<p>■ ОБЪЕКТ</p> <p>■ Здания с АХП</p> <p>Арх. Доминанты:</p> <p>● Уровень 2</p> <p>● Уровень 3</p>	Здание Тульского машиностроительного завода имени Рябикова не является доминантой. Архитектурное освещение полностью соответствует статусу здания, прекрасно выявляет его архитектуру и декоративные элементы фасада.
Советская улица, 1А			<p>■ ОБЪЕКТ</p> <p>■ Здания с АХП</p> <p>Арх. Доминанты:</p> <p>● Уровень 3</p>	Здание Тульского оружейного завода не является доминантой. Архитектурное освещение полностью соответствует статусу здания, прекрасно выявляет его архитектуру и декоративные элементы фасада.
Советская улица, 2			<p>■ ОБЪЕКТ</p> <p>■ Здания с АХП</p> <p>Арх. Доминанты:</p> <p>● Уровень 2</p> <p>● Уровень 3</p>	Здание Городского концертного зала не является архитектурной доминантой. Архитектурное освещение здания равномерно заливает светом фасад, выходящий на улицу Советская. В контексте окружающей световой среды и градостроительного значения здание имеет завышенную яркость главного фасада.
Советская улица, 78			<p>■ ОБЪЕКТ</p> <p>■ Здания с АХП</p>	Здание по улице Советская, 78 не является архитектурной доминантой. Архитектурное освещение здания подчеркивает архитектурные особенности, но из-за разной цветности источников и за счёт высокой яркости здание визуально вырвано из вечерней городской среды. Рядом находится площадь Ленина, где сосредоточены основные ближайшие к зданию доминанты. В контексте окружающей световой среды и градостроительного значения здание имеет завышенную яркость главного фасада.
Тургеневская улица, 13			<p>■ ОБЪЕКТ</p> <p>■ Здания с АХП</p>	Освещение здания по Тургеневской улице, 13 имеет завышенную яркость, неуместную с учётом того, что здание не является доминантой. Используемые приёмы архитектурного освещения выявляют все архитектурные особенности здания, но за счёт высокой яркости здание визуально вырвано из вечерней городской среды. Рядом находится площадь Ленина, где сосредоточены основные ближайшие к зданию доминанты.

Рис. 3. Пример общих данных объектов с существующим освещением

нию целостности городской среды в вечернее время, нерациональному потреблению энергоресурсов, негативному влиянию освещения на зрительное восприятие и психоэмоциональное состояние человека [1–4].

Тула – небольшой город площадью 145,8 км², расположенный в 200 километрах от Москвы. Для небольших городов проектирование освещения объектов выполняется специалистами удалённо, что также сказывается на качестве выполненных решений.

Применение методов исследования распределения яркости в поле зрения является актуальной задачей и позволяет выявить объекты с качественно выполненным архитектурным освещением. Анализ яркостных характеристик существующего освещения может производиться в качестве предварительного этапа перед созданием световой стратегии, светового мастер-плана города [5–7].

Цель работы заключалась в проведении с помощью оптоэлектронных приборов исследования распределения яркости по освещённым фасадам на примере центральных улиц г. Тулы.

В ходе работы была оценена существующая световая среда, что позволило выявить наиболее характерные проблемы. Оценка распределения яркости производилась прямым методом в соответствии с ГОСТ 26824–2010 и ГОСТ Р 55707–2013 с использованием фотоаппарата *LMK Mobile Advanced*. Использование специализированного программного обеспечения *LMK LabSoft* для анализа полученных результатов позволяет обрабатывать, анализировать и отображать значения яркости измеряемых поверхностей. Измерения производились в августе 2017 г., предварительная подготовка осветительных установок не производилась [8,9].

2. Методология исследования

Методология исследования заключалась в проведении градостроительного анализа и последующего фотометрического анализа существующей световой среды. Градостроительный анализ включал в себя изучение наиболее важных характеристик города, структурный анализ города, анализ

пешеходных маршрутов, площадей и важных центров притяжения, выявление зон вероятного нахождения наблюдателей освещённых объектов и нанесение их на карту.

В исследовании были рассмотрены объекты с архитектурным освещением 11 центральных улиц г. Тулы: Советской, Металлистов, Октябрьской, Ложевой, Пролетарской, Первомайской, Менделеевской, Фридриха Энгельса, Крестовоздвиженской пл., Красноармейского пр-кта, пр-кта Ленина. Обработаны 235 файлов измерений, определена иерархия объектов в городской структуре, проведён сравнительный анализ яркостей объектов.

Градостроительный анализ был проведён с использованием геоинформационных систем, на карту были последовательно нанесены данные об освещённых объектах с целью последующего анализа. Здания с архитектурным освещением на рассмотренных 11-ти улицах представлены на рис. 1.

Оценка распределения яркости осуществлялась прямым методом с помощью фотоаппарата *LMK Mobile Advanced* с ПЗС-матрицей *CMOS*

Советская улица, 56А		66 кд/м2, наиболее яркая часть светового пятна - 140 кд/м2, рекламная строка - 220 кд/м2	15 кд/м2, 200 кд/м2 (для рекламы)	Норма по яркости превышена в 4,4 раза. Средняя яркость наиболее интенсивного светового пятна в 9,3 раз выше нормируемой. рекламное освещение выше нормы в 1,1 раз. Соотношение максимальной и минимальной освещенности в пределах освещаемой поверхности превышает 30:1, что является причиной высокого контраста, не воспринимается объем здания.
Путейская улица, 4		46 кд/м2, наиболее яркая часть светового пятна - 98 кд/м2	30 кд/м2	Яркость фасада соответствует нормам. Здание Московского вокзала является архитектурной доминантой 3-его уровня, поэтому допустимо превышение нормы по яркости на 50 % (до 45 кд/м2).
Красноармейский проспект, 48к1.		73 кд/м2, наиболее яркая часть светового пятна - 167 кд/м2	15 кд/м2	Норма по яркости превышена в 4,8 раз. Средняя яркость наиболее интенсивного светового пятна в 11 раз выше нормируемой. Соотношение максимальной и минимальной освещенности в пределах освещаемой поверхности превышает 30:1, что является причиной высокого контраста, не воспринимается объем здания.
Тульское чаепитие. Скульптура		7 кд/м2	10 кд/м2	Яркость памятника незначительно ниже нормы. Решение является допустимым, т.к. поверхность памятника - темная.
Октябрьская улица, 78		37кд/м2, наиболее яркая часть светового пятна - 65 кд/м2, реклама - 91 кд/м2	30 кд/м2	Яркость фасада соответствует нормам. Церковь Сергия Радонежского у Московской заставы является архитектурной доминантой 2-го уровня, поэтому допустимо превышение нормы по яркости на 50 % (до 45 кд/м2). Рекламное освещение пиццерии, в 2,5 раза ярче освещения фасада церкви, что является причиной смещения визуального восприятия доминирующего объекта.

Рис. 4. Фотометрические данные объектов измерений



Рис. 5. Средние и максимальные значение яркости проанализированных объектов

Canon APS-C, скорректированной под относительную спектральную чувствительность глаза стандартного наблюдателя МКО $V(\lambda)$. Прибор откалиброван для измерения яркости при значениях диафрагменного числа от $F4$ до $F11$, фокусное расстояние – от 18 до 50 мм, доступное значение светочувствительности ISO – от 100 до

1600, разрешение 5566×3706 (эффективных пикселей 2748×1834), угловой размер поля зрения: $65 \times 45^\circ$ для фокусного расстояния 17 мм и $28 \times 19^\circ$ для фокусного расстояния 50 мм, время экспозиции $30-1/1000$ с, пределы допускаемой относительной погрешности измерения яркости $\pm 5\%$.

Условия выполнения измерений:

- объектив фотоаппарата экранирован от попадания в него постороннего света;
- на поверхность измерения не падает тень от фотоаппарата или человека, проводящего измерения;
- фотоаппарат расположен на линии, исходящей из центра зоны наблюдения в направлении объекта;
- фотоаппарат установлен на высоте 1,5 м от поверхности дорожного покрытия.

Перед измерениями предварительная подготовка осветительной установки (замена перегоревших ламп и чистка светильников) не производилась.

Спектральная чувствительность измерительного прибора показана на рис. 2.

Количественным критерием фотометрической оценки была средняя яркость выделяемого светом элемента в соответствии с СП 52.13330.2016, а также минимальное и максимальное значения яркости и их соотношение [10]. В ходе исследования были рассмотрены 56 объектов в градостро-

тельном контексте с существующим архитектурным освещением, проанализирована стилистика подходов, и полученные данные были внесены в общую базу данных объектов.

3. Результаты

Проведённое исследование позволило выявить наиболее качественно выполненные объекты в рамках фрагмента города, ограниченного 11-ю центральными улицами. При этом были выявлены и проанализированы на предмет соответствия главным целям нормирования освещения общие тенденции существующего освещения города Тулы. В результате было установлено, что яркостные характеристики 12-ти объектов из 56-ти выполнены с соблюдением нормативных требований, тогда как для ряда объектов уровень средней яркости оказался выше нормируемого более чем в 10 раз.

Результаты оценки рассмотренных 56-ти объектов и их яркостных характеристик были внесены в базу данных объектов, пример которой приведён на рис. 3 и 4.

Средние яркости элементов фасадов для 6-ти объектов значительно превышают указанные в нормативных требованиях значения. Для ряда объектов среднее значение яркости близко к нормированному, и при этом отношения максимального значения яркости к минимальному значительно превышают указанные в требованиях СП 52.13330.2016 [10]. Значения средней, максимальной и минимальной яркостей выделяемых светом элементов зданий с архитектурным освещением представлены на рис. 5 и 6.

В соответствии с результатами измерений в 82 % случаев средняя яркость выделяемого светом элемента для зданий с акцентирующим освещением превышает 10 кд/м². Значение 30 кд/м², которое является максимально допустимым в соответствии с СП 52.13330.2016, превышено для 54 % объектов, что приводит к композиционному разрушению городских фрагментов, нерациональному использованию энергетических ресурсов, негативному влиянию на зрительное восприятие.

Минимальные значения яркости выделяемых светом элементов в 85 % случаев не превышают уровня яркости 1 кд/м². В соответствии с СП 52.13330.2016, соотношение мак-

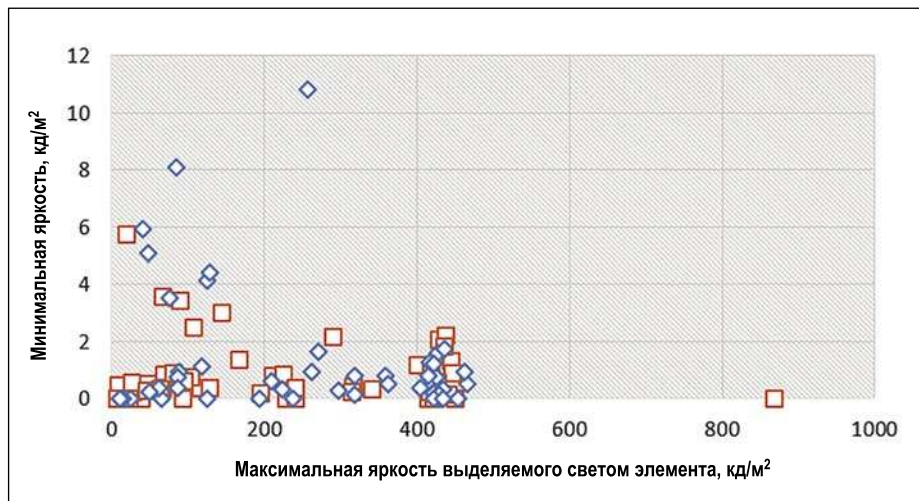


Рис. 6. Минимальные и максимальные значения яркости проанализированных объектов



Рис. 7. Фотография освещённого фасада (слева) и представленное в псевдоцветах распределение яркости по фасаду (справа), Староникитская ул., дом 1

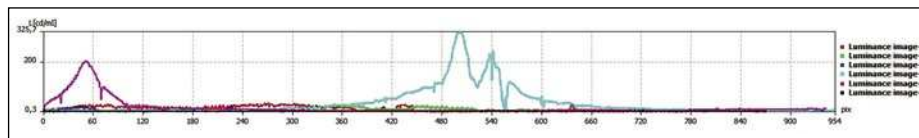


Рис. 8. Распределение яркости на изображении фасада, Староникитская ул., дом 1



Рис. 9. Фотография освещённого фасада (слева) и представленное в псевдоцветах распределение яркости по фасаду (справа), Менделеевская ул., дом 1

симального значения освещённости к минимальному не должно превышать 30:1. В связи с тем, что поверхности фасадов условно можно принять диффузно-отражающими, вместо соотношений освещённостей можно рассматривать соотношения яркостей. Экспериментально полученные данные позволяют сделать вывод о том, что допустимый уровень указанного отношения превышен в 87 % случаев. Следствием является композици-

онное разрушение фасада и неверное считывание архитектурного облика города в ночное время.

Примеры приёмов освещения, негативно влияющих на зрительное восприятие фасадов, приведены на рис. 7–10.

4. Заключение

Измерительные приборы нового поколения позволяют производить

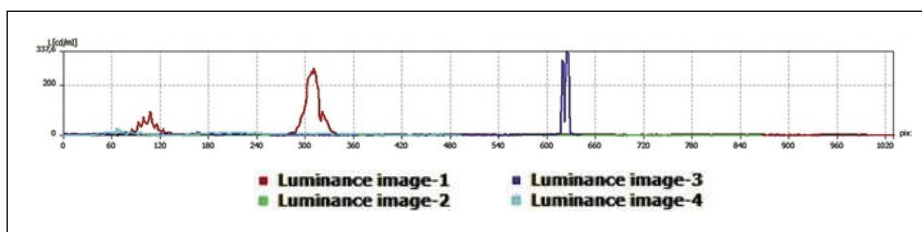


Рис. 10. Распределение яркости на изображении фасада, Менделеевская ул., дом 1

комплексный анализ световой среды за счёт увеличения количества проводимых фотометрических исследований, что представляет большой интерес и важно для развития качества освещения.

Значительное расхождение реальных и нормированных значений яркости фасадов во многом связано с тем, что в момент ввода в эксплуатацию объекта с архитектурным освещением не всегда производится регулирование и оценка качества внедряемых решений. Далеко не во всех городах России архитектурное освещение объектов находится на балансе предприятий по эксплуатации установок наружного освещения, учёт архитектурного освещения, зачастую, не ведётся.

Результаты исследования показывают важность уточнения существующих нормативных требований, например, нормирования максимально допустимых значений яркости с целью сохранения целостности городской среды в вечернее время и рационализации потребления энергоресурсов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Быстрянцева Н.В. Развитие теории световой среды вечернего города // Светотехника.– 2012.– № 5. – С. 60–63.
2. Быстрянцева Н.В. Эстетика световой среды // Наука, образование и экспериментальное проектирование: Материалы научно-практической конференции 11–15 апреля: Тезисы докладов. – М.: МАРХИ, 2014. – С. 331–332.
3. Быстрянцева Н.В., Ван дер Хейде, Р. Формула света: исследование световой среды района Волхонки // В: Территория культуры. Кварталы Волхонки: Монография. – М.: Проект Белый Город, 2014.– 115 с.
4. Щенетков Н.И. Световой дизайн города: учебное пособие // М.: Архитектура-С, 2006.– 320 с.
5. Malska W., Wachta H. Elements of Inferential Statistics in a Quantitative Assessment of Illuminations of Architectural Structures // IEEE Lighting Conference of the Visegrad Countries (Lumen V4) Location: Karpacz, POLAND Date: SEP 13–16, 2016

6. Lopez-Besora, J., Isalgué, A., Roura, H.C. A digital image processing method for urban scenes brightness assessment, ACE: Architecture, City and Environment – 2016. – Vol. 32, No. 11. – P. 157–170. DOI: 10.5821/ace.11.32.4837. ISSN: 1886–4805

7. Schielke, T. Tutorial: Rationale, Concepts, and Techniques for Lighting Vertical Surfaces // LEUKOS.– 2013. – Vol. 9, No. 4. – P. 223–243.

8. ГОСТ Р 55707–2013 Освещение наружное утилитарное. Методы измерений нормируемых параметров

9. ГОСТ 26824–2010 Здания и сооружения. Методы измерения яркости

10. СП 52.13330.2016 Естественное и искусственное освещение (актуализированная редакция СНиП 23–05–95).



Колгушкина Светлана Владимировна. Магистр. Окончила НИУ «МЭИ» (2012 г.). Аспирант Университета ИТМО (Санкт-Петербург, Россия)



Быстрянцева Наталья Владимировна, кандидат архитектуры, доцент. Руководитель образовательной программы «Световой дизайн» Университета ИТМО



Прокопенко Виктор Трофимович, доктор технических наук, заслуженный деятель науки РФ. Окончил государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» имени В.И. Ульянова (Ленина) (1963 г.). Профессор кафедры Световых технологий и оптоэлектроники Университета ИТМО

На форуме «Армия –2019» МСК «БЛ ГРУПП» показала решения для ВПК

С 25 по 30 июня 2019 г. в конгрессно-выставочном центре «Патриот» в Кубинке прошёл Международный военно-технический форум «Армия-2019». Посетители стенда МСК «БЛ ГРУПП» ознакомились с широким спектром металлоконструкций «OPORA ENGINEERING» и светильников «GALAD», в том числе «Урбан S LED», «Победа LED», «Виктория LED», «Омега LED», «Аврора LED», «Урал LED», «Аркалайн




Эконом LED», «Аркалайн Стандарт LED», «Фортиус LED», «Эверест LED», «Юниор LED», «Аларм LED», «Раунд LED», «Аркалайн Фито LED», «Твин Фито LED» и «Тактик LED».

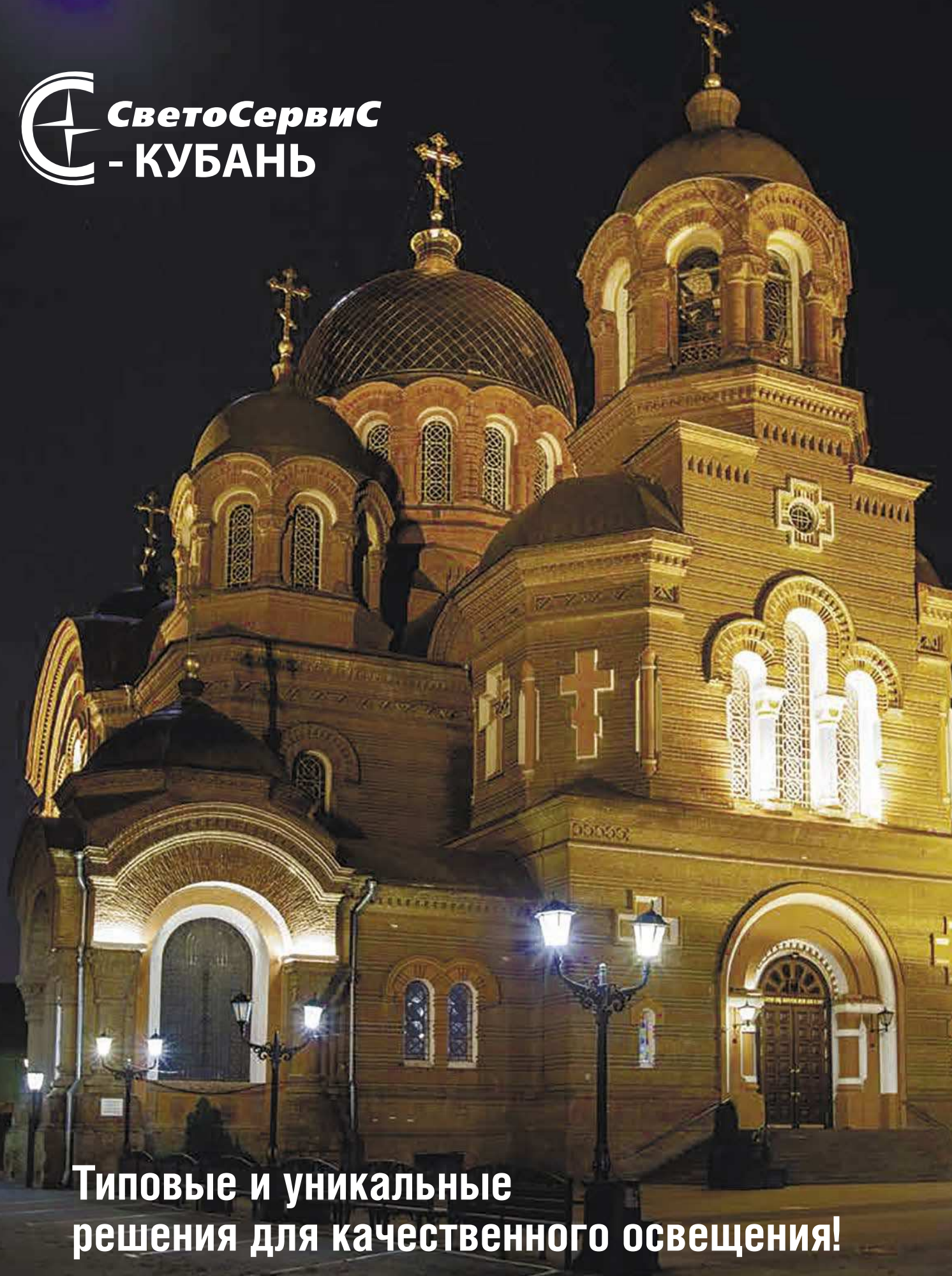
Целая группа решений отвечала специфическим потребностям в освещении предприятий ВПК. Например, было представлено оборудование для освещения территории аэродромов – сигнальные огни «Глиссада LED».

Удалось познакомиться аудиторию Форума и с продукцией «БЛ Групп» для управления освещением. Андрей Киричок, заместитель директора по развитию компании «Светосервис Телемеханика», входящей в МСК «БЛ ГРУПП», принял участие в круглом столе «Особенности применения энергоэффективных светотехнических решений на объектах военно-строительного комплекса». Он рассказал о работе автоматизированной системы управления освещением «БРИЗ» и озвучил предложения по внедрению продукции на инфраструктурных объектах Министерства обороны РФ.

bl-g.ru
01.07.2019



СветоСервис
- КУБАНЬ



**Типовые и уникальные
решения для качественного освещения!**



350000, г. Краснодар, ул.
Северная, 324М



svetoservis_k@mail.ru
svetoservis.ru



+7 (861) 274-98-93

Коэффициент использования для архитектурного освещения¹

К.Д. ГАЛАТАНУ^{1,4}, М. АШРАФ², Д.Д. ЛУКАЧЕ¹, Д. БЮ³, К. ЧИУГУДЕАНУ³

¹ Технический университет им. Г. Асаки, Иаси, Румыния.

² Столичный научно-технический университет, Исламабад, Пакистан.

³ Технический университет г. Клуж Напока, Клуж Напока, Румыния.

⁴ E-mail: catalin.galatanu@tuiasi.ro

Аннотация

Рассмотрена возможность применения оптического коэффициента использования (ОКИ) для минимизации светового загрязнения при проектировании архитектурного освещения. Показано, что ОКИ нельзя применять для оценки светового загрязнения из-за наличия взаимных отражений (*interreflections*). При этом использовались моделирование в *Dialux* и встроенные функции системы *MATLAB*. Были выполнены измерения освещённости и яркости. Показано, что в случае фасада значение ОКИ может быть больше, чем единица. Продемонстрировано увеличение яркости в результате небольших взаимных отражений и, как следствие, возможность уменьшения уровня архитектурного освещения. Основным результатом является изменение подхода к оценке светового загрязнения, в том смысле, что увеличение ОКИ не эквивалентно уменьшению светового загрязнения, а фасад может оказаться более «заметным» при меньших уровнях освещения.

Ключевые слова: увеличение яркости, взаимные отражения внутри полости, измерение яркости, формирование расчётной сетки.

1. Введение

Традиционный подход к оценке светового загрязнения основан на зрительном комфорте и экономии энергии. Световое загрязнение при этом рассматривалось с точки зрения комфорта отдельных людей, а не в глобальном масштабе, как это делается сегодня, когда «проводятся исследования, направленные на ограничение влияния светового загрязнения на здоровье людей, окружающую среду и видимость звёзд, на оценку его влияния на экосистему, на выработку

мер по борьбе со световым загрязнением, и даже рассматривающие игнорируемые обществом потери культурных ценностей, которые были частью искусства, науки и культуры с самого возникновения этих объектов» [1]. Одним из направлений этих исследований было измерение глобального светового загрязнения на основе результатов наблюдения свечения неба [2]. Другой подход заключался в рассмотрении источников светового загрязнения. Очевидно, что основным источником светового загрязнения является освещение улиц, хотя существенный вклад вносит и архитектурное освещение [3–5]. Борьбу за уменьшение светового загрязнения возглавляют астрономы, которые подходят к этому вопросу гораздо шире [6]. Интересным примером может служить проект Евросоюза *STARS4ALL*, финансируемый в рамках программы *European Union H2020 Program*. В основе этого проекта лежит исчерпывающее определение: «Световое загрязнение – это избыточное, плохо направленное или ненужное искусственное освещение в ночное время» [7]. В этом определении термины «избыточное» и «плохо направленное» вполне понятны, тогда как «ненужное» может вызвать разногласия, особенно в случае освещения фасадов. В основу настоящего исследования положена гипотеза, что освещение, не чрезмерное и хорошо направленное, необходимо для увеличения привлекательности фасада, но уровень светового загрязнения при этом может оказаться разным. Этот уровень можно оптимизировать при помощи оптического коэффициента использования (ОКИ). Дополнительный довод в пользу необходимости данного исследования

можно найти в [8], где к световому загрязнению относят только паразитный свет, свечение неба, слепящую блёккость и нарушающее право владения освещение (*trespass lighting*).

Важность ОКИ продемонстрирована и в [9], где можно найти реальное описание проблемы: «основная часть светового потока источников света (70–80 %) не попадает на здание и излучается в небо. И этот свет гораздо важнее для оценки светового загрязнения, чем свет, отражённый даже от слишком ярко освещённого фасада» [9]. Эта формулировка подтверждает важность ОКИ, которая оказывается даже выше, чем при традиционном подходе [10], когда коэффициент использования служил показателем энергоэффективности освещения дорог. [11] позволяет найти больше общего между освещением фасадов и освещением дорог: «оценка энергоэффективности освещения дорог, основанная на приведённой удельной мощности, проводится с учётом применяемого осветительного оборудования, отражательных свойств дорожного покрытия (или фасада!) и коэффициента технического обслуживания. Оценка энергоэффективности освещения дорог, основанная на удельной установленной мощности, допускает дополнительный учёт чрезмерности освещения, связанной со слишком высоким (необоснованным) по сравнению с требуемым уровнем яркости дорожного покрытия (или фасада!)».

2. Важность оптического коэффициента использования (ОКИ)

ОКИ традиционно применяется при проектировании внутреннего искусственного освещения или освещения улиц, и всё ещё встречается в публикациях последних лет [7].

ОКИ представляет собой отношение светового потока, реально поступающего на рассматриваемую поверхность, к полному световому потоку, излучаемому источником света².

Ниже приведена запись этого определения применительно к архитектурному освещению:

² В Международном светотехническом словаре *CIE S017/E:2014* этот параметр называют просто коэффициентом использования (*utilization factor*, термин 1383), однако в переводе сохранил использованный авторами термин *optical utilization factor* (оптический коэффициент использования). – Прим. пер.

¹ Перевод с англ. Е.И. Розовского

$$FUF = \frac{\varnothing_u}{\varnothing_t}, \quad (1)$$

где FUF – коэффициент использования для архитектурного освещения, аналогичный ОКИ, \varnothing_u – полезный световой поток, \varnothing_t – нормированный световой поток источника света.

Важным параметром является также и КПД светильника (LOR), так как он позволяет учесть полные потери светового потока, включая имеющие место при походе света внутри светильника. Этот параметр рассчитывают по формуле:

$$LOR = \frac{\text{Световой поток светильника}}{\text{Световой поток источника света}}. \quad (2)$$

Допущение, что FUF эквивалентно ОКИ, можно принять, однако другое, содержащееся в [11], утверждение

$$FUF \leq LOR \quad (3)$$

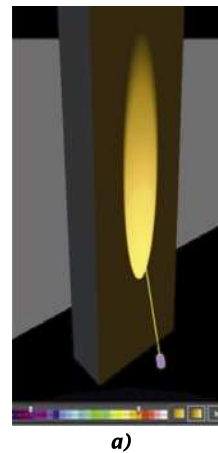
нуждается в тщательном анализе.

Любые попытки отрицать уравнение (3) выглядят, как попытки усомниться в законе сохранения энергии. Тем не менее, невыполнение уравнения (3) можно продемонстрировать. В основе аргументации лежат взаимные отражения (*interreflections*) (освещение объекта светом, отражённым от других объектов, не являющихся источниками света), которые приводят к «умножению» светового потока. После демонстрации этого, полученные результаты можно использовать для обеспечения максимального зрительного эффекта при минимальном значении светового потока, что эквивалентно уменьшению светового загрязнения.

Обсуждение необходимо, так как полезный световой поток \varnothing_u не является теоретическим параметром. Кроме того, в [11] он определяется на основе измерений яркости фасада, которая, в конечном итоге, включает в себя и отражённый свет!

В другой статье того же автора [12] приводятся подробности измерения полезного светового потока, основанного на проводившихся в полевых условиях измерениях яркости: «Если известны средняя яркость фасада, площадь его поверхности S и коэффициент отражения её материала ρ , то можно рассчитать полезный световой поток ... (считая, что взаимные отра-

Рис. 1:
а – смоделированный в *DIALux* плоский фасад;
б – распределение силы света светильника в полярных координатах (кд/1000 лм)



жения отсутствуют)». Но эта последняя гипотеза в [11] вообще не исследовалась, тогда как для многих фасадов (отличных от плоских поверхностей) нельзя говорить об отсутствии взаимных отражений.

3. Коэффициент усиления светового потока в случае взаимных отражений от вогнутых поверхностей

Идея введения коэффициента усиления светового потока основана на хорошо известном выражении для расчёта освещённости на внутренней поверхности интегрирующей сферы [13]:

$$E_{fin} = E_1 \frac{\rho}{1-\rho}, \quad (4)$$

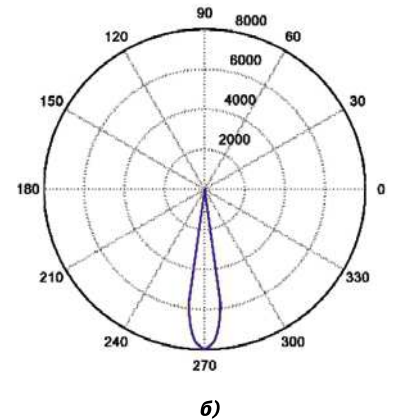
где E_{fin} – конечная (после взаимных отражений) освещённость на внутренней поверхности сферы, лк; E_1 – начальная (прямая) освещённость на внутренней поверхности сферы, лк; ρ – коэффициент отражения внутренней поверхности сферы³.

Очевидно, что умножив обе части уравнения (4) на площадь внутренней поверхности сферы S получаем выражение для расчёта полезного светового потока:

$$\varnothing_u = \varnothing_t \frac{\rho}{1-\rho}, \quad (5)$$

откуда следует, что

³ Уравнение (4) предполагает, что исходный световой поток распределён по внутренней поверхности сферы равномерно, но даже в этом случае уравнение (4) должно записываться, как $E_{fin} = E_1/(1-\rho)$. – Прим. пер.



$$\begin{aligned} OKI &= \frac{\varnothing_u}{\varnothing_t} \cdot 100 \% = \\ &= \frac{\rho}{1-\rho} \cdot 100 \% > 100 \%. \end{aligned} \quad (6)$$

Конечно, то, что в случае интегрирующей сферы ОКИ оказался большим, чем 1, связано с максимальным использованием взаимных отражений. Можно сделать вывод, что для других форм фасада значения ОКИ окажутся другими. Для демонстрации этого следует двигаться от простых вариантов к более сложным.

3.1. Идеально плоский фасад

Это наиболее распространённый случай, который можно использовать как точку отсчёта при рассмотрении других конфигураций.

Модель в программе *DIALux* сформирована для вертикального фасада размером 1,2 x 4 м (размер поверхности), реализованного в виде прямоугольного параллелепипеда толщиной 0,5 м, расположенного при (0, 4, 0) с поворотом на (0°, 0°, 180°) (рис. 1). Эти размеры позволили сформировать модель в программе *DIALux*. Проектор заливающего света расположен на расстоянии 0,3 м от фасада в точке (0; 3,4; 0,1) в координатах программы *DIALux* и светит под углом 165° относительно горизонтали, т.е. (0°, 165°, -90°). В прожекторе установлен источник света со световым потоком 2700 лм, а КПД прожектора равен 46,7 %. Это чрезвычайно низкое значение КПД было получено в результате расчётов, проведённых в *LDT Editor Software* (компания *DIAL*) после модификации исходных файлов светильника, произведённой для исключения силы света в направлениях, выходя-

Распределение силы света осветительного прибора, использовавшегося при моделировании в *DIALux*

Угол, град.	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Сила света, кд/1000 лм	8000	7900	7800	7700	7500	7200	6800	6300	5700	0

Таблица 2

Результаты, полученные при моделировании в *DIALux* (S_{facade} – рассматриваемая поверхность, M_f – коэффициент технического обслуживания, E_{med} – средняя освещённость)

	Входные параметры				Результаты		
	\varnothing_i , лм	S_{facade} , м ²	M_f	LOR, %	E_{med} , лк	\varnothing_u , лм	ОКИ, %
Значение	2700	1,2 x 4	0,85	46,7	223	2699	99,8

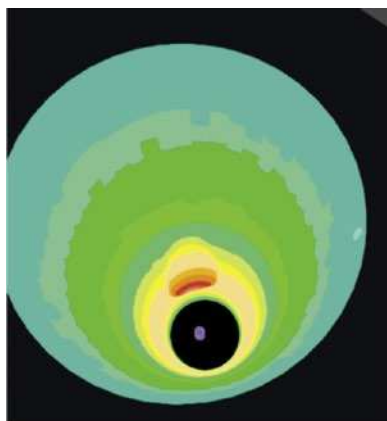


Рис. 2. Взаимные отражения внутри цилиндра

щих за пределы 9° относительно оптической оси. Это ограничение было введено для того, чтобы при полном использовании света ОКИ оказался равным 100 %. Распределение силы

света рассматривавшегося осесимметричного осветительного прибора представлено в табл. 1.

Результаты расчётов, приведённые в табл. 2, оказались предсказуемыми, но будут полезны в дальнейшем. При этом следует отметить, что ОКИ практически равен 100 %, однако его расчётное значение оказалось равным 99,8 %. Эта погрешность обусловлена недостаточным количеством десятичных знаков при расчётах в *DIALux*.

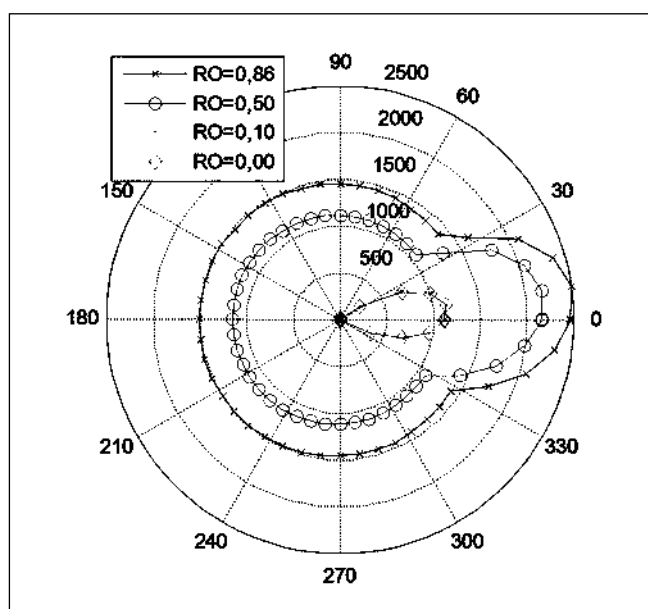
Мы ожидаем, что ОКИ, равный 100 %, не будет идеальным, хотя при этом светильник не излучает посторонний свет (*spilling light*). Простые оценки, проведённые с использованием уравнения (5) применительно к окрашенной белой краской поверхности ($\rho = 0,86$), показали, что в этом случае коэффициент усиления светового потока окажется большим, чем 6!

3.2. Усиление полезного потока в случае цилиндра

Взаимные отражения на обычном фасаде формируются цилиндрическими элементами, как мелкомасштабными (оконные рамы), так и крупномасштабными (своды или арки). Для оценки возможных значений коэффициента усиления полезного потока, по аналогии с интегрирующей сферой будут получены его предельные значения, соответствующие случаю цилиндра (рис. 2).

Для облегчения понимания, рис. 2 соответствует тому же, что и на рис. 1, положению источника света. Стена была заменена цилиндром радиусом 0,3 м. Высота цилиндра, опять же, была равна 4 м, а количество элементарных поверхностей, использовавшихся для аппроксимации цилиндра, было равно 44 (размеры 42,84 мм \times 4 м, что эквивалентно площади поверхности 0,17136 м²). Для каждой отдельной поверхности была рассчитана средняя освещённость (рис. 3), что обеспечило возможность сравнения прямой освещённости (соответствующей коэффициенту отражения, равному $\rho = 0,0$) с другими вариантами, получаемыми при наличии взаимных отражений и равных 0,10; 0,59 и 0,86 значениям коэффициента отражения. Из полученных результатов следует, что вариант с $\rho = 0,10$ очень близок к случаю прямого освещения, а при $\rho = 0,86$ взаимные отражения максимальны.

Необходимо сделать методическое замечание: из-за особенностей экспорта результатов из *DIALux*, все данные следует извлекать по-отдельно-

Рис. 3. Средняя освещённость на внутренней поверхности цилиндра (лк) при разных значениях коэффициента отражения ρ

Значения ОКИ для цилиндра, использовавшегося при моделировании в *DIALux*

Коэффициент отражения стенок, ρ	0,0	0,10	0,50	0,86
Полезный световой поток, Φ_u , лм	2715	3110	23885	30340
Полный световой поток, Φ_t , лм	2700	2700	2700	2700
ОКИ	1	1,152	8,846	11,237

сти, особенно потому, что в *DIALux* цилиндр рассматривается как совокупность не связанных друг с другом элементов с конкретными характеристиками (*particular values*), а не как определённый вектор (*specific vector*). Но даже при наличии подобных затруднений, в результате получается соотношение между полным световым потоком лампы Φ_t и падающим на стенку цилиндра полезным световым потоком Φ_u (табл. 3).

Опять же, ОКИ говорит о том, что взаимные отражения усиливают полный световой поток. Из-за специфического метода расчётов, используемого в *DIALux* (метод переноса фотонов), и трудности указания расчётных точек для цилиндрических элементов, результатам, представленным в табл. 3, присуща некоторая неопределённость, которую следует устранить. Основным признаком неопределённости служит результат сравнения с интегрирующей сферой, в случае которой ОКИ имеет хорошо известное значение, получаемое в результате сложения $\rho/(1-\rho)$ с 1 (прямое освещение источником света) (табл. 4).

Эту коррекцию можно осуществить, воспользовавшись точными расчётами взаимных отражений, алгоритм выполнения которых в *MATLAB* разработан авторами.

3.3. Расчёты ОКИ, выполняемые в *MATLAB* для цилиндра

Внутренняя поверхность цилиндра, аналогичного изображённому на рис. 2 и имеющего диаметр 0,6 м и длину 4 м, была сформирована в *MATLAB*. Прямое освещение обеспечивалось в центральной зоне цилиндра при постоянном уровне освещённости 100 лк. Это допущение облегчало расчёт вклада отражённого светового потока в конечное значение ОКИ. Преимущества расчётов в *MATLAB* состоят в последователь-

Таблица 4
Значения ОКИ для интегрирующей сферы

Коэффициент отражения стенок, ρ	0,0	0,10	0,50	0,86
ОКИ = $\rho/(1-\rho) + 1$	1	1,11	2,0	7,14

Рис. 4. Смоделированное в *MATLAB* взаимное отражение света в закрытом цилиндре (начальная освещённость 100 лк)

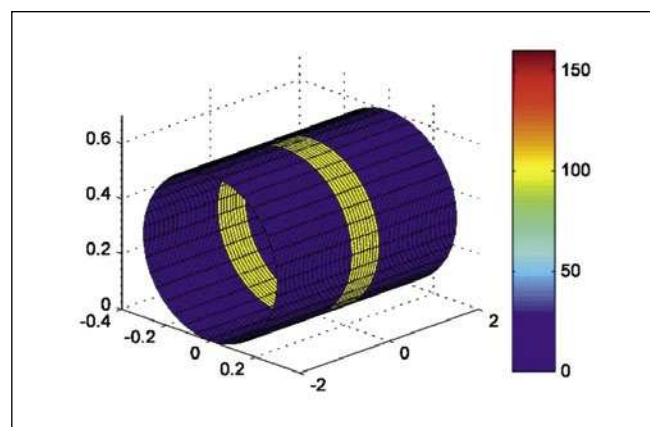
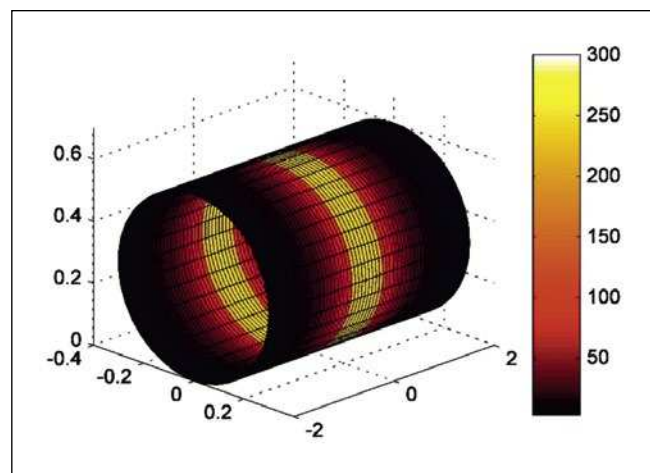


Рис. 5. Освещённость на внутренней поверхности цилиндра (лк) после 6-ти взаимных отражений



ной оценке светового потока после каждого отражения.

Формирование сетки для этого цилиндра отражено ниже:

$R=0,3\text{ м}$ – радиус цилиндра, использовавшегося при оценке взаимных отражений

$j=1-59$ – номер элемента продольной образующей цилиндра (4 м),

$i=1-36$ – номер элемента окружности цилиндра

$XCIL(j, i)=R*\cos((i-1)*2*\pi/35)$ – для области $(-0,5; 0,4)$ на рис. 4

$YCIL(j, i)=2-(j-1)*4/58$ – для области $(-2; 2)$ на рис. 4

$ZCIL(j, i)=.30-R*\sin((i-1)*2*\pi/35)$ – для области $(-0; 0,6)$ на рис. 4

конец

конец

Задав равный 100 лк уровень прямой (начальной) освещённости (жёлтый цвет на рис. 4), мы получили ис-

Рис. 6. Начальная прямая освещённость на внутренней поверхности цилиндра (лк)

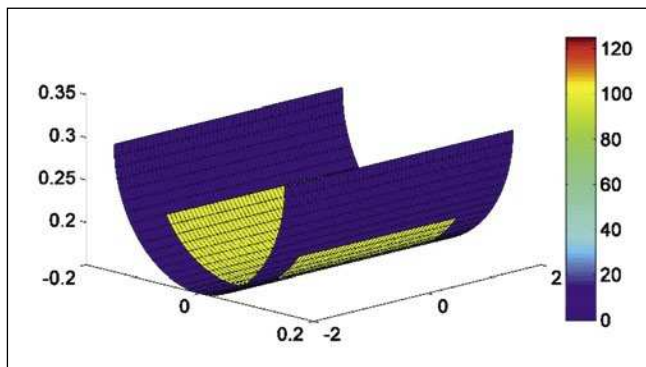


Рис. 7. Конечная (после 6-ти шагов) освещённость на внутренней поверхности цилиндра (лк)

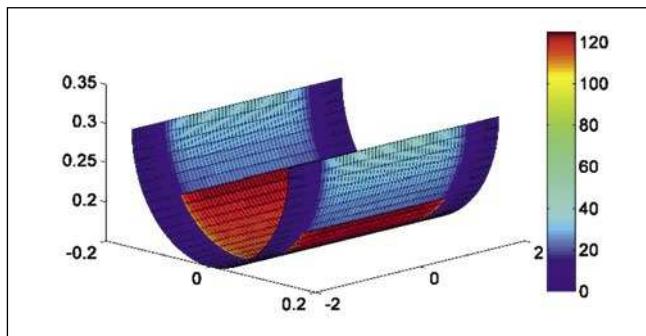


Рис. 8. Изображения, иллюстрирующие измерение яркости в случаях плоской поверхности (а) и вогнутой призматической поверхности (б)

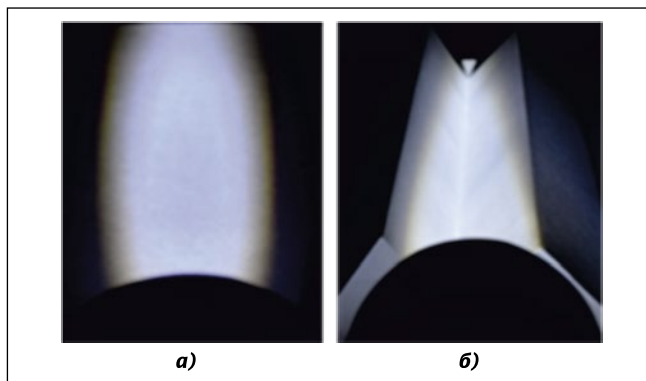
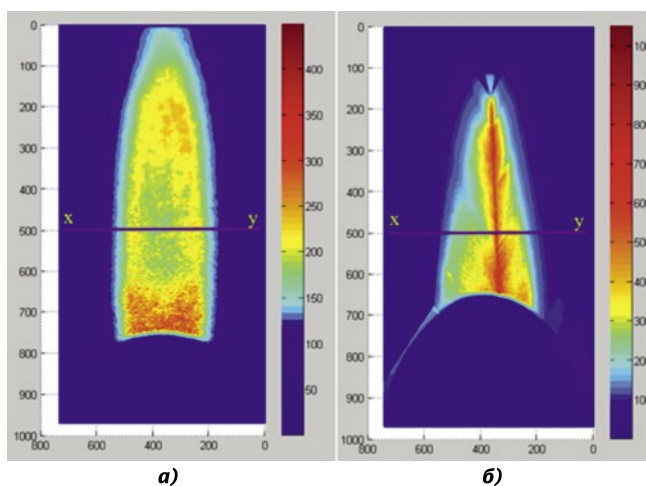


Рис. 9. Распределение яркости по плоской поверхности (а) и вогнутой призматической поверхности (б)



ходную модель для расчёта взаимных отражений в *MATLAB*.

Взаимные отражения в глубинных зонах цилиндра *рассматриваются так же, как и в модели для интегрирующей сферы* (см. табл. 4). Это свя-

зано с тем обстоятельством, что световым потоком, выходящим через торцы цилиндра, можно пренебречь (т.к. длина цилиндра равна 4 м). Это позволило получить быстрое подтверждение точности наших расчётов.

Визуальный анализ показал, что и после шести диффузных отражений световой поток всё ещё сосредоточен в центральной зоне цилиндра (рис. 5).

3.4. ОКИ для вогнутой цилиндрической поверхности фасада

После подтверждения правильности сформированной в *MATLAB* модели был рассмотрен общий случай вогнутой цилиндрической поверхности (*cylindrical concavity*) с освещённой центральной зоной. В основу этого представления легли имеющие небольшие или средние размеры вогнутые части фасадов, и при этом не преследуется цель расчёта ОКИ, который зависит от случайных факторов. То, что ОКИ превышает 100 %, является всего лишь иллюстрацией того факта, что он не может служить хорошим показателем для оценки светового загрязнения.

На рис. 6 представлена начальная конфигурация с 36x56 цилиндрическими элементами с уровнем освещённости 100 лк (для элементов 9–28 на окружности и для элементов 9–49 на продольной образующей цилиндра), а на рис. 7 приведён результат визуализации отражённого потока после шести шагов расчётов.

В дополнение к качественной оценке, в табл. 5 приведены значения отражённого светового потока, полученные на каждом шаге проведения расчётов.

Следует отметить, что после шести взаимных отражений световой поток существенно уменьшается, и им можно пренебречь. Даже в этом конкретном случае значение ОКИ изменяется очень быстро и становится больше, чем 1 (или 100 %), а это говорит о том, что ОКИ не может служить показателем уровня светового загрязнения.

4. Измерение увеличения ОКИ

Возможность увеличения ОКИ может оказаться полезной для проектировщиков с точки зрения уменьшения светового загрязнения, даже если ОКИ не является объективным критерием его оценки. Наличие взаимных отражений позволяет увеличить яркость фасада при неизменном значении излучаемого светильниками светового потока. Экспериментальное подтверждение этого позволяет оценить

Расчёт ОКИ после отражения от вогнутой цилиндрической поверхности

Кол-во отражений	1	2	3	4	5	6
Прошедший световой поток, лм	5679	1587	512	159	50,2	15,7
Ослабление	-	0,279	0,323	0,312	0,314	0,313
Полный световой поток, лм	5679	7267	7779	7939	7990	8005
ОКИ	1,000	1,279	1,370	1,398	1,407	1,409

выгоду от наличия на фасаде взаимных отражений. Нами использовался простой испытательный стенд, состоящий из прожектора заливающего света, освещающего по касательной плоскую поверхность. Начальная конфигурация служит чем-то вроде точки отсчёта для случая, когда плоская поверхность заменяется на декоративные призматические поверхности, имеющие ширину 3 см и равный 80° угол между плоскостями. Яркость измерялась при одной и той же экспозиции при помощи фотокамеры с возможностью перехода от RGB к яркости [14, 15]. На рис. 8 и 9 приведены, соответственно, визуальное представление стенда и результаты измерения яркости.

Соответствующие рис. 9а начальные результаты представлены на рис. 10, на котором можно заметить, что яркость в центральной освещённой зоне является квазипостоянной при близком к 180-ти уровне RGB.

Добавление светового поля, обусловленного наличием небольшой вогнутой призматической поверхности (*prismatic concavity*) (без каких бы то ни было других изменений), приводит к другим результатам (рис. 11).

На рис. 11, полученном на основе приведённых на рис. 9 данных, видно, что яркость в центральной зоне явно возрастает (значения RGB близки к 230). Во внутреннем двугранном угле яркость выше, что полезно с точки зрения выделения фасада. Следует отметить, что этот эффект достигнут при той же, что и на рис. 8, конфигурации осветительной установки.

Несмотря на то, что сравнение рис. 10 и 11 позволило сделать качественные выводы, необходимо провести ещё и количественную оценку яркости. Последнее обусловлено тем обстоятельством, что датчик на основе прибора с зарядовой связью (в данной работе использовался фотоаппа-

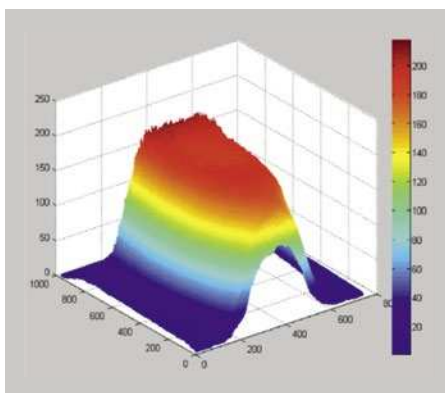


Рис. 10. Значения RGB для освещённой плоской поверхности фасада (соответствует рис. 9а)

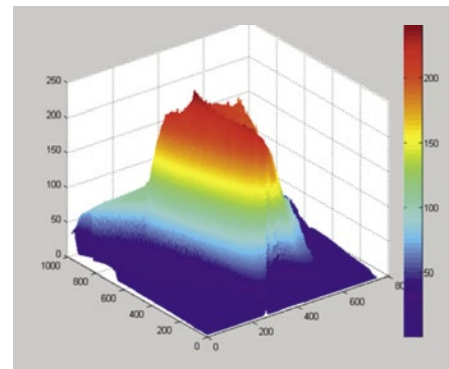
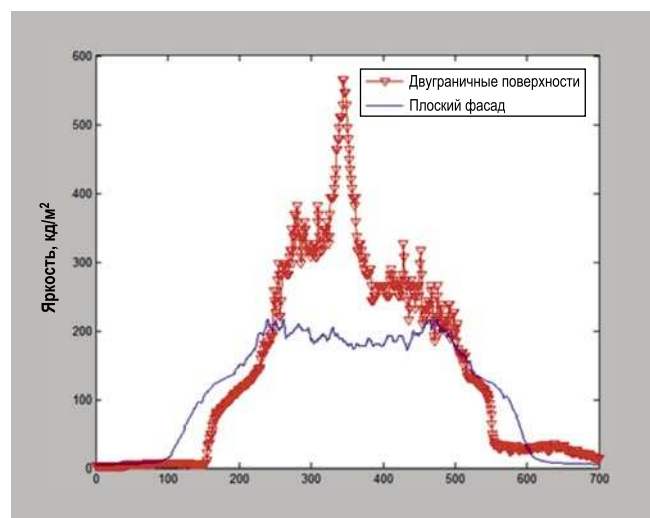


Рис. 11. Значения RGB для вогнутой призматической поверхности, условия освещения которой совпадают с соответствующими рис. 10

Рис. 12. Сравнение яркостей (кд/м^2) центральных участков изображений, приведённых на рис. 8 (направление x-y показано на рис. 9)



рат *NIKON D5300*) имеет нелинейную характеристику [14, рис. 1], которая насыщается при высоких значениях яркости. При помощи полученной экспериментально для нашего фотоаппарата функции оптоэлектронного преобразования, с учётом использованных настроек (время экспонирования $1/20$ с, диафрагма *F8* и *ISO100*) были получены значения яркости для обоих рассмотренных вариантов.

Цвета, которыми отображены поля яркости на рис. 11 и 10, не совпадают,

но, тем не менее, можно заметить, что различия между этими полями очень велики. Для демонстрации увеличения яркости были использованы значения яркости для направления x-y (горизонтальная линия на рис. 9), которые для облегчения сравнения совмещены на рис. 12.

В абсолютных величинах яркость возрастает более чем в два раза, и это ещё один интересный факт, указывающий на возможность обеспечения того же зрительного эффекта при меньшем

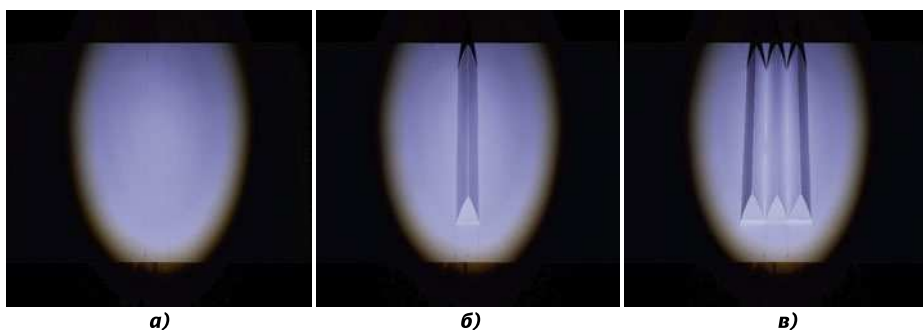


Рис. 13. Увеличение яркости при наличии продольных треугольных профилей: а – плоский фасад; б – фасад с одним профилем; в-фасад с тремя профилями

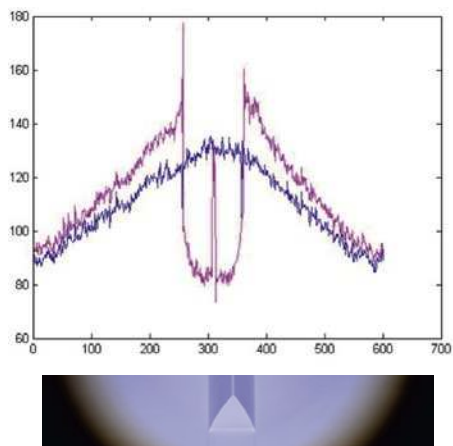


Рис. 14. Увеличение яркости (кд/м²) в случае одного продольного профиля (лиловая линия) по сравнению с плоским фасадом (синяя линия)

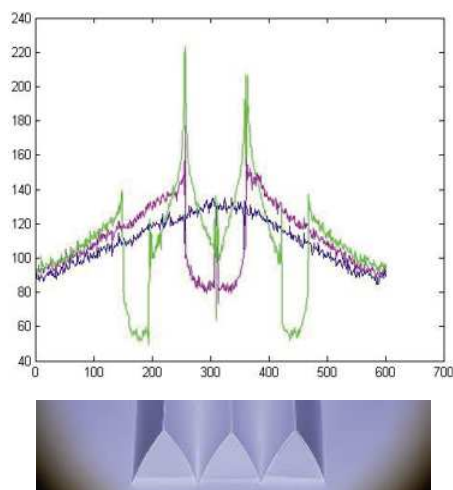


Рис. 15. Увеличение яркости (кд/м²) в случае трёх продольных профилей (зелёная линия) по сравнению со случаем одного продольного профиля (лиловая линия) и с плоским фасадом (синяя линия)

значении светового потока и меньшем световом загрязнении. Дополнительно следует отметить, что приведённые на рис. 12 высокие значения яркости обусловлены малым масштабом модели.

5. Увеличение яркости в случае многочисленных продольных профилей

В случае архитектурных элементов, увеличение яркости, обусловленное наличием продольных профилей, может способствовать уменьшению уровня архитектурного освещения благодаря увеличению яркостного контраста, например, для некоторых оконных рам. Снижение общего уровня архитектурного освещения является одним из способов уменьшения светового загрязнения. Для демонстрации того, как происходит увеличение яркости, следует не рассмотреть вогнутую призматическую поверхность, подобную показанной на рис. 8, а сравнить значения яркости, полученные применительно к плоскому фасаду (рис. 13а), со значениями яркости, полученными применительно к фасадам с одним продольным треугольным профилем (рис. 13б) и тремя продольными профилями (рис. 13в).

Для демонстрации увеличения яркости можно использовать поперечное распределение яркости в середине рассматриваемой области, как это сделано на рис. 14 и 15.

Размеры профилей, окрашенных яркой белой краской, составляли 25 мм в основании и 45 мм в высоту. Геометрия и электрические параметры были одинаковы для всех трёх вариантов.

Единичный профиль не привёл к существенному увеличению яркости (лиловая линия на рис. 15), тогда как увеличение количества профилей привело к заметному увеличению яркости в вогнутой части системы, где имеют место взаимные отражения (зелёная линия на рис. 15). При этом яркость возросла до 160–200 кд/м², тогда как её начальное значение, соответствующее случаю плоского фасада,

было равно 120 кд/м². 50-процентное увеличение яркости имеет очень важное значение, особенно для находящегося на небольшом расстоянии наблюдателя. Знание того, что некоторые элементы фасада будут обеспечивать повышенные уровни яркости, может подвигнуть проектировщика освещения на уменьшение общего (среднего) уровня освещённости.

6. Заключение

Рассмотрение значений ОКИ (как расчётных, так и измеренных) говорит о том, что величина ОКИ не может служить единственным критерием при оценке светового загрязнения. ОКИ является лишь одним из важных критериев, но лишь на первых этапах процесса проектирования, обеспечивая некоторую информацию о свете, излучаемом непосредственно в небо.

Если же учесть взаимные отражения, то ситуация меняется. Используя небольшие профили, имеющиеся на фасадах зданий, можно добиться некоторого важного увеличения яркости. Благодаря этому, при проектировании можно уменьшить уровень общего архитектурного освещения, важным следствием чего будет уменьшение светового загрязнения. Начиная с увеличения яркости на 50 %, это увеличение может рассматриваться как коэффициент ослабления архитектурного освещения, что может оказаться очень интересной перспективой.

Световое загрязнение можно уменьшить не во вред привлекательности фасадов. Это возможно, если творчески использовать элементы фасада, изменив подход «стена света» на подход «красота элементов». Элементы фасада будут заметнее благодаря увеличению яркостного контраста, которое продемонстрировано на рис. 15 и получено не посредством использования теней, а благодаря увеличению яркости.

Эта работа финансировалась грантом Евросоюза *COST Action ES1204, Loss of the Night Network*, а также европейским проектом *STARS4ALL.EU*, направленным на привлечение внимания к отрицательному влиянию искусственного света на благополучие населения, разнообразие форм жизни, видимость звёзд, безопасность и непроизводительное расходование энергии.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Muñoz Conte, T., Ferrandis, I.G., Ferrandis, X.G. Light pollution in natural science textbooks in Spanish secondary Education // European Journal of Science and Mathematics Education.– 2016. – Vol. 4, No. 2. – P. 129-139.

2. Haenel, A., Posch, T., Ribas, S. J. et al. Measuring night sky brightness: methods and challenges // Journal Of Quantitative Spectroscopy & Radiative Transfer.– 2018. – Vol. 205. – P. 278–290.

3. Falchi, F., et al. Limiting the impact of light pollution on human health, environment and stellar visibility // Journal of Environmental Management.– 2011, doi:10.1016/j.jenvman.2011.06.029.

4. Garner, C. Tackling unwanted light: an international perspective // Light & Engineering.– 2012. – Vol. 25, No. 1. – P. 24–39.

5. Гарднер К. Борьба с нежелательным светом: международная практика // Светотехника.– 2012.– № 1. – С. 6–18.

6. Saraji, R., Saju Oommen, M. Light Pollution Index (LPI): An Integrated Approach to Study Light Pollution with Street Lighting and Façade Lighting // Leukos.– 2012. – Vol. 9, No. 2. – P. 127–145.

7. <http://stars4all.eu/index.php/lp/>, cited on 15.05.2017.

8. *** – Colchester Borough Council, External Artificial Lighting Guidance 2012, <http://www.colchester.gov.uk/CHttpHandler.ashx?id=17398&p=0>, cited on 12.04.2017.

9. Zagan W. Opinion: Obtrusive light and floodlighting // Lighting Res. Technol.– 2015. – Vol. 47. – P. 640.

10. Pracki, P. A proposal to classify road lighting energy efficiency // Lighting Res. Technol.– 2011. – Vol. 43. – P. 271–280.

11. Skarżyński, K. An attempt at controlling the utilization factor and light pollution within the context of floodlighting // Przegląd Elektro-techniczny, ISSN0033–2097, R. 92 NR9/2016

12. Skarżyński, K. Field Measurement of Floodlighting Utilization Factor // Proc. of 2016 IEEE Lighting Conference Of The Visegrad Countries (LUMEN V4), IEEE, 345 E47TH ST, New York.

13. Gălățanu, C.D. Geometry Influence on the Precision of Light Flux Measurement with Ulbricht Integrating Sphere // 9th Int. Conf. and Exposition on Electrical and Power Engineering (EPE), 2016. – P. 604–608,

14. Wüller, D., Gabele, H. Digital Photography III, edited by Russel A. Martin, Jeffrey M. DiCarlo, Nitin Sampat. // Proc. of SPIE-IS&T Electronic Imaging, SPIE, 2007, Vol. 6502, 65020U, © 2007 SPIE-IS&T. 0277–786X/07/\$18.

15. Gutierrez, JA, Ortiz de Lejarazu, D, Real, J.A., Mansilla, A., Vizmanos, J. Dynamic measurement of traffic sign luminance as perceived by a driver // Lighting Res. Technol.– 2012. – Vol. 44. – P. 350–363.



Каталин Даниэль Галатану (Cătălin Daniel Gălățanu). Профессор Технического университета им. Г. Асаки, Иаси, Румыния



Мухаммад Ашраф (Muhammad Ashraf). Доцент Столичного технического университета, Исламабад, Пакистан



Дорин Думитру Лукаше (Dorin Dumitru Lucașe). Профессор Технического университета им. Г. Асаки, Иаси, Румыния



Дорин Бю (Dorin Bui). Доцент Технического университета г. Клуж Напока, Клуж Напока, Румыния



Калин Чиугудеану (Călin Ciugudeanu). Лектор Технического университета г. Клуж Напока, Клуж Напока, Румыния

«Лисма» будет строить завод в Нигерии

Состоялась встреча генерального директора завода «Лисма» Игоря Константинова с исполнительным губернатором штата Энугу Лоуренсом Ифеани Угвуани, главной темой которой стало создание светотехнического производства на территории африканского государства. Участниками мероприятия также стали директор по развитию «Лисмы» Сергей Ермаков и генеральный директор инвестиционного управления развития штата Энугу Чибузор Окафор.



Г-н Угвуани подтвердил серьезность намерений бизнеса и государственной власти крупнейшего нигерийского штата относительно сотрудничества с российским предприятием. Власти штата готовы предоставить землю с необходимой инфраструктурой, обеспечить налоговые и другие экономические преференции.

«Сотрудничество с Африкой мы считаем очень перспективным и стратегически важным направлением развития бизнеса, – отметил И. Константинов. – У предприятия уже есть успешно реализованный проект на территории Чёрного континента – в прошлом году запущено совместное производство ламп в Бурунди. Поэтому к работе в Нигерии мы приступаем с ещё более высоким уровнем компетенций и большим опытом.

Накануне приёма у губернатора штата состоялась встреча руководства «Лисмы» с потенциальными инвесторами, представителями бизнес-кругов и банковских структур Энугу. Принимающая сторона показала земельный участок с необходимыми коммуникациями, выделенный под будущее производство. Предварительно обсуждены вопросы производства ламп накаливания, разрядных ламп и светильников на солнечных батареях. В настоящее время идёт подготовка Меморандума, который регламентирует условия сотрудничества, объёмы финансирования и сроки.

lisma.su/
03.07.2019

Реализуем проекты любого уровня сложности



195112, г. Санкт-Петербург,
Заневский проспект, дом 54,
корпус 5



info@spb.svsrv.ru
svetoservis.ru



+7 (812) 448-57-19

Разработка и анализ экономического комплексного устройства управления освещением¹

С. САХАНА, Б. РОЙ

Джадавпурский университет, Колката, Индия
E-mail: sahana.sagnita@gmail.com

Аннотация

Разработано комплексное устройство управления освещением (далее – УУО) на основе датчика естественной освещённости. Это экономичное УУО работает на основе данных, полученных от встроенных датчика естественной освещённости и датчика присутствия. Проведён анализ работы УУО при использовании различных датчиков для управления цепями питания ламп применительно к небольшим системам внутреннего освещения. Уровни чувствительности фотоприёмника (т.е. фоторезистора (ФР)) и датчика присутствия (т.е. пассивного инфракрасного датчика (ПИД)) можно регулировать с помощью встроенного средства настройки после экспериментального измерения характеристик чувствительности обоих датчиков. Управляя системой внутреннего освещения с помощью разработанного УУО, можно уменьшить потребление электроэнергии при отсутствии человека в любом помещении. Также можно изменять мощность лампы в зависимости от сезонных изменений уровня освещённости посредством выбора значения опорного напряжения и минимизировать потребление электроэнергии за счёт использования естественного света. Это решение является недорогим благодаря низкой стоимости компонентов и датчиков.

Ключевые слова: энергосбережение, фоторезистор, устройство управления освещением, пассивный инфракрасный датчик.

1. Введение

Электроэнергия является одним из важнейших ресурсов экономического развития любой страны. Чтобы удовлетворить возрастающую потребность

в электроэнергии, обусловленную ростом населения и стремительной урбанизацией, необходимо оптимальное использование энергии. Предыдущие исследования показали, что энергия, потребляемая осветительными установками, составляет 20–40 % от общего энергопотребления коммерческих зданий [1] и 50 % от общего энергопотребления жилых зданий [2]. Поэтому экономия расходуемой на освещение энергии может значительно снизить общее потребление электроэнергии. Экономия энергии, расходуемой на освещение, может быть достигнута посредством усовершенствования системы управления освещением в результате правильного выбора стратегии управления освещением. Автоматизация освещения позволяет автоматически управлять искусственным освещением в зависимости от присутствия человека, уровня естественной освещённости, личных предпочтений пользователя в отношении условий освещения и даже времени максимального спроса на электроэнергию [3]. Грамотное использование сочетания естественного света с системой искусственного освещения может сэкономить значительное количество электроэнергии. Это может быть достигнуто с помощью основанной на использовании светочувствительных датчиков системы управления освещением, обеспечивающей регулировку мощности системы искусственного освещения в соответствии с уровнем естественной освещённости [4]. Светочувствительные системы управления освещением обычно работают на основе таких детекторов, как датчик присутствия, фотодатчик и т.д. Широко распространённые системы управления основаны на различных технологиях. Система *Philips ActiLume 1–10 V* была разработана для достижения значительной экономии энергии (до 70 %) за счёт сочетания регистрации как присутствия, так и на-

личия естественного освещения [17]. В ней используется система *ActiLume Wireless 1–10 V*, которая состоит из датчика *ActiLume 1–10 V* и беспроводной распределительной коробки *ActiLume 1–10 V* [18]. Существует также несколько систем, основанных на протоколе *DALI* [19, 20]. В этой статье представлено устройство управления освещением (УУО), которое может измерять естественную освещённость и регистрировать присутствие человека, а также соответствующим образом управлять световым потоком установки искусственного освещения. Поэтому разработанное УУО может использоваться для включения/выключения света, а также как светорегулятор. Из-за высокой цены на существующие УУО их приобретают нечасто. Поэтому цель состоит в том, чтобы разработать экономически эффективное УУО, которое подтолкнуло бы пользователей в сторону минимизации энергопотребления.

2. Цели

Конкретные цели работы – это энергосбережение, автоматическое управление освещением и уменьшение затрат посредством разработки УУО, которое включает в себя датчик присутствия и фотодатчик. Это необходимо для создания такой системы управления освещением на основе сведений о присутствии людей в помещении и уровне естественной освещённости, которая обеспечивала бы требуемый уровень освещённости в присутствии людей. В настоящее время существует множество технологий, доступных для регулирования мощности источников света, но в описываемой работе был разработан простой светорегулятор для применения во внутреннем освещении, использующий широтно-импульсную модуляцию (ШИМ) и симистор, запускаемый с помощью импульса, обеспечивающего разные углы открытия этого симистора. ФР, который используется в качестве фотодатчика, представляет собой очень дешёвое решение; пассивный ИК-датчик также доступен на рынке по низкой цене. Для проведения измерений нами использовались наиболее распространённые источники света для внутреннего освещения, то есть трубчатые люминесцентные лампы (ТЛЛ) и компактные люминесцентные лампы (КЛЛ). Однако с помощью

¹ Перевод с англ. А.Г. Савицкой

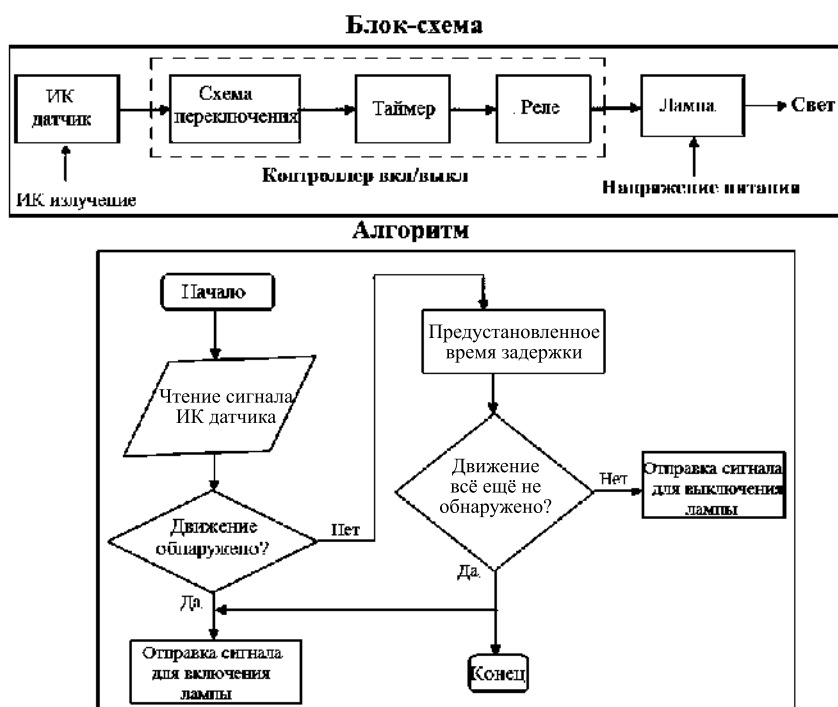


Рис. 1. Схема I

этого УУО можно управлять и любыми светодиодными источниками света со встроенными устройствами управления. В этой работе эффективность разработанного УУО оценивается на основе результатов измерения электрических и фотометрических характеристик с использованием в качестве тестовых образцов распространённых типов ламп, а именно ТЛЛ и КЛЛ. Это УУО может использоваться в сельских районах, а также в различных системах внутреннего освещения, чтобы уменьшить количество расходуемой на освещение электрической энергии.

3. Конструкция устройства управления освещением

Были разработаны две разные цепи датчиков, которые были совмещены с электрической схемой УУО с помощью различных схем, обеспечивающих непрерывное управление лампой с использованием ФР и ПИД.

3.1. Схема управления освещением I

В этой схеме источник света автоматически включается и выключается на основе сведений о присутствии людей, полученных с помощью датчика LHI 968.

ПИД LHI 968 с типичной чувствительностью 3,8 кВ/Вт используется в этой цепи в качестве датчика при-

сутствия. Это коммерчески доступный и очень дешёвый датчик присутствия, который для обнаружения присутствия или любого движения объектов принимает и измеряет инфракрасное излучение, исходящее от объекта в его поле зрения, и реагирует на него. Этот датчик называется пассивным, потому что он сам не излучает никакой энергии, но генерирует сигнал на основе инфракрасного излучения в пределах своей зоны обнаружения. Элементы ПИД обычно имеют симметричную форму и размещены дискретно с определённым шагом для отделения термически индуцированных зарядов от пьезоэлектрически индуцированных зарядов и для лучшего подавления синфазных сигналов. Эти дискретные элементы называются встречными (гребенчатыми) электродами. Для фокусировки инфракрасного излучения от объектов на чувствительный элемент датчика используется линза Френеля, которая, помимо прочего, защищает прибор от внешних воздействий. ИК-датчик наиболее чувствителен к излучению с длиной волны 10 мкм, которая является пиковой длиной волны излучения человеческого тела. Однако ИК-датчики требуют отсутствия препятствий перед объектом и не могут легко различить людей и мелких животных. У них есть «мёртвые» зоны, в которых движение в поле зрения не может быть обнаружено.

Схема управления лампой включает в себя электронные схемы для автоматического включения и выключения лампы на основе данных о присутствии людей в помещении. Напряжение питания преобразуется в управляющее напряжение постоянного тока для работы схемы. Блок-схема этого УУО и соответствующий алгоритм приведены на рис. 1. При обнаружении какого-либо движения на базу транзистора подаётся сигнал более высокого напряжения, который запускает реле, чтобы зажечь лампу.

Схема состоит из:

- Источника питания.
- ИК датчика.
- Блока управления.
- Схемы включения лампы.

3.2. Схема управления освещением II

В этой схеме используется ФР на основе сульфида кадмия (CdS), выступающий в качестве датчика естественной освещённости. Это небольшое круглое пассивное полупроводниковое устройство с переменным сопротивлением, зависящим от количества света, падающего на его поверхность. Величина сопротивления уменьшается с увеличением количества падающего света, и наоборот. В отсутствие падающего света ФР имеет измеряемое в мегомах максимальное сопротивление, которое называется темновым сопротивлением. Типичное значение в этом случае составляет 100 МОм. ФР был покрыт белым рассеивателем для рассеивания света, падающего с разных направлений, а также для минимизации косинусной погрешности.

Блок-схема и алгоритм для этой модели показаны на рис. 2. Схема включает в себя измерительный мост и один компаратор IC741. Компаратор сравнивает выходное напряжение ФР с заданным опорным напряжением и, в зависимости от результата, приводит в действие реле для включения или выключения лампы. Для того, чтобы избежать дребезга контактов реле и искрового разряда в катушке реле во время работы, использовались конденсатор и диод.

Схема состоит из:

- Источника питания.
- ФР.
- Схемы включения лампы.

3.3. Схема управления освещением III

В этом случае УУО должно обеспечить плавное светорегулирование и требуемый уровень освещённости, исходя при этом из количества естественного света, падающего на ФР. Блок-схема регулятора светового потока приведена на рис. 3.

Разработанная схема состоит из:

- ФР.
- Регулятора светового потока
- Схемы запуска симистора.
- Схемы включения лампы.

Уровень напряжения постоянного тока, соответствующего требуемому уровню освещённости, устанавливается в качестве опорного напряжения контроллера. Угол открытия симистора контролируется генерируемым ШИМ-сигналом. В целях безопасности был использован оптоизолятор для отделения стороны с низким напряжением от стороны с высоким напряжением.

3.4. Схема управления освещением IV

Это итоговая схема, предназначенная для регистрации присутствия человека и определения уровня естественной освещённости, а также для управления световым потоком источника света в соответствии с изменениями естественной освещённости. При использовании на практике датчики могут быть расположены на потолке, куда напрямую будет попадать естественный свет. В некоторых случаях может оказаться, что естественная освещённость в этом месте будет очень низкой. В этих случаях требуемый уровень освещённости может быть достигнут посредством настройки сопротивления потенциометра, соответствующего опорной освещённости. Разработанная схема состоит из трёх частей:

- ПИД.
- ФР.
- Светорегулятор. Обе цепи датчиков были связаны и интегрированы в схему основного УУО. Светорегулятор работает только тогда, когда ПИД обнаруживает человека. Мощность лампы можно уменьшить в соответствии с требуемым уровнем освещённости, изменяя угол открытия симистора в соответствии с шириной ШИМ-сигнала.

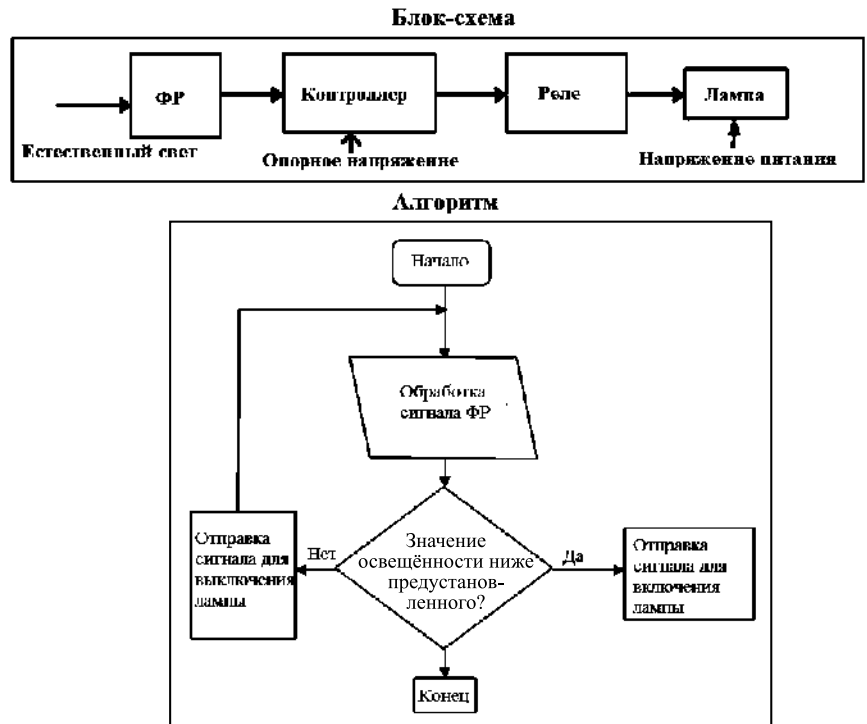


Рис. 2. Схема II



Рис. 3. Схема III

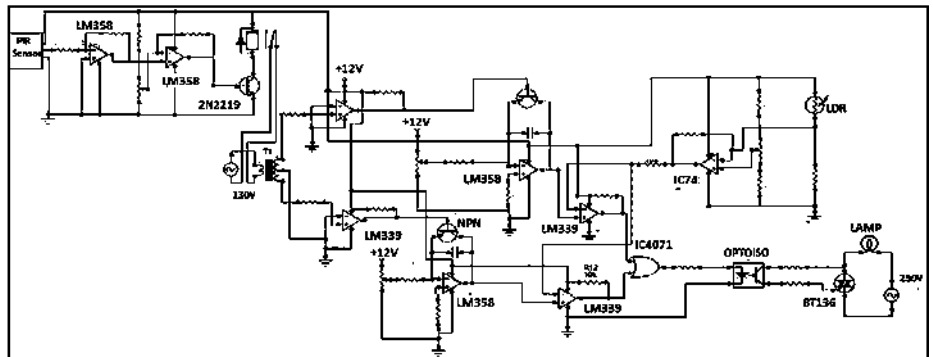


Рис. 4. Принципиальная электрическая схема УУО

Фотография и итоговая схема УУО показаны на рис. 4 и 5.

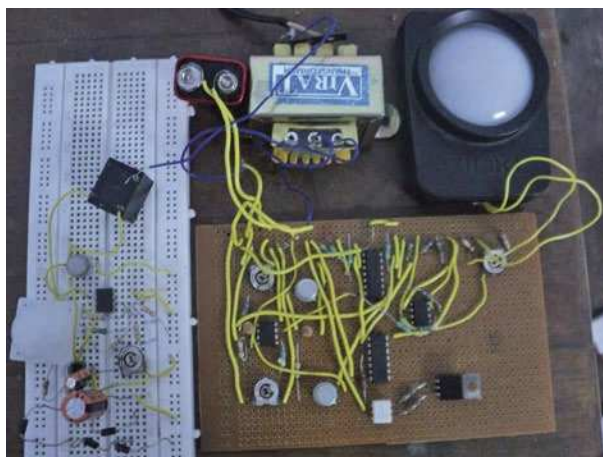
4. Результаты эксперимента и анализ работы

Разработанное УУО было проанализировано теоретически и экспериментально применительно к нескольким характеристикам. Светорегулирование ламп, предназначенных для внутреннего освещения, исследовалось экспериментально с использованием разработанного УУО.

4.1. Спектральная чувствительность ФР

Спектральная чувствительность ФР близка к функции $V(\lambda)$, то есть к функции чувствительности человеческого глаза. В данном исследовании для ФР не было обеспечено никакой цветовой коррекции. Значения освещённости были измерены с использованием прибора *Konica Minolta Chromameter CL 200*. Зависимость выходного сигнала ФР от освещённости показана на рис. 6.

Рис. 5. Разработанное УУО



$$U_i = U_r \left[\frac{1}{\pi} (\pi - \alpha + \frac{1}{2} \sin(2\alpha)) \right]^{1/2},$$

где U_i – напряжение питания лампы, В, U_r – среднеквадратичное значение напряжения системы, В, α – угол открытия симистора, рад. Изменение управляющего напряжения на 1 В эквивалентно изменению ширины импульса на 18° . Экспериментальные и теоретические значения углов открытия симистора и соответствующее изменение напряжения питания лампы (рис. 8, 9) сравнивались для проверки чувствительности УУО. Обнаружено, что с увеличением управляющего напряжения, то есть с увеличением ширины импульса, угол открытия симистора увеличивается, и наоборот. А с увеличением угла открытия симистора напряжение питания лампы уменьшается, что приводит к уменьшению мощности лампы. Наблюдается небольшая разница между теоретическими значениями и результатами измерения угла открытия симистора и напряжения питания лампы.

Сгенерированное УУО выходное управляющее напряжение и соответствующее напряжение на лампе показаны на рис. 10 и 11 на примере имеющих разную мощность ламп двух типов, которые обычно используются во внутреннем освещении.

4.4. Регулирование световых потоков ламп

Эффективность разработанного УУО была проверена на нескольких источниках света. Световые потоки ламп измеряли с помощью интегрирующей сферы диаметром 2,5 м и рабочей лампы. Характеристики светорегулирования ЛН, ТЛЛ и трёх КЛЛ (одна лампа мощностью 15 Вт и две лампы по 23 Вт) показаны на рис. 12.

Из приведённых графиков видно, что с увеличением управляющего напряжения световой поток лампы уменьшается. Для КЛЛ мощностью 15 Вт световой поток может быть уменьшен до 36 %. Но в случае КЛЛ мощностью 23 Вт для анализа работы УУО использовались два разных образца. Образец № 1 имел более низкое значение светового потока (1300 лм) и более низкий коэффициент мощности (0,85), чем образец № 2 (1350

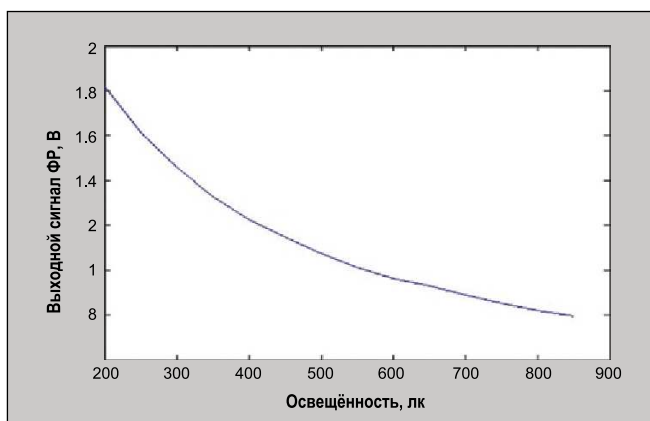


Рис. 6. Характеристика чувствительности резистора

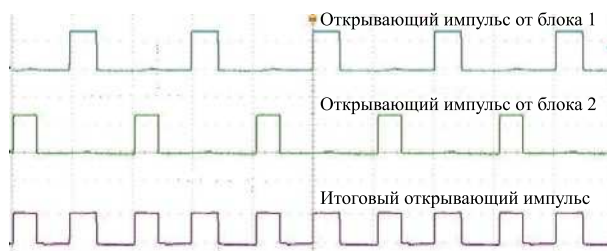


Рис. 7. Итоговый управляющий сигнал

4.2. Сигнал управления напряжением лампы

Сгенерированные сигналы от каждого блока разработанного УУО наблюдались и регистрировались при помощи 4-канального цифрового осциллографа *DPO 4034* компании *Tectronix*. Сгенерированный управляющий импульс (т.е. ШИМ-сигнал) УУО показан на рис. 7.

4.3. Экспериментальная установка и анализ

Разработанное УУО, реагирующее на естественный свет, может применяться для регулирования световых потоков ламп, обычно используемых для внутреннего освещения. С помощью разработанной схемы было про-

ведено регулирование световых потоков следующих источников света: лампа накаливания мощностью 60 Вт на напряжение питающей сети 230 В (ЛН), трубчатая люминесцентная лампа мощностью 36 Вт с электромагнитным пускорегулирующим аппаратом, три не являющиеся лампами прямой замены компактные люминесцентные лампы (КЛЛ) мощностью 15 Вт, а также две КЛЛ мощностью 23 Вт (образцы № 1 и № 2). В соответствии с изменением естественной освещённости, ширина управляющего импульса изменяется, что приводит к открытию симистора при разных углах. Напряжения питания лампы при разных углах открытия были измерены и сравнены с теоретическими значениями, рассчитанными с помощью выражения:

лм и 0,89 соответственно). При этом в случае КЛЛ мощностью 23 Вт образец № 1 – это лампа холодно-белого света, не являющаяся лампой прямой замены, а образец № 2 – это лампа прямой замены тёпло-белого света. При рассмотрении характеристик этих двух ламп видно, что световой поток образца № 2 был уменьшен всего на вплоть до 10 %, а образца № 1 – на вплоть до 30 %. Мы использовали светорегулируемые и не являющиеся лампами прямой замены КЛЛ с 4-мя контактами, у которых пускорегулирующий аппарат не встроен в цоколь, так что у них источник питания подключается снаружи. Однако КЛЛ прямой замены, как правило, к светорегулируемым не относятся. Это связано с тем, что в настоящее время все КЛЛ прямой замены сконструированы таким образом, что при колебаниях напряжения питания их световые потоки остаются неизменными. Таким образом, можно утверждать, что образец № 1 был спроектирован так, чтобы стабилизировать значение светового потока при изменении напряжения питания. У образца № 2 возможно более глубокое светорегулирование, и её световой поток уменьшается почти линейно.

5. Экспериментальные исследования УУО, обеспечивающего светорегулирование с учётом естественной освещённости

В разработанном УУО необходимое для генерации импульса открытия симистора управляющее напряжение поступает от блока с ФР. Значение естественной освещённости преобразуется в соответствующий уровень управляющего напряжения с помощью ФР.

5.1. Управляющее напряжение от блока ФР

Управляющее напряжение, поступающее от блока ФР, варьировалось посредством изменения уровня освещённости, создаваемой падающим светом на поверхности рассеивателя. При фиксированном значении опорного напряжения, величина управляющего напряжения, генерируемого блоком ФР, возрастает с увеличением уровня освещённости, создаваемой падающим светом (рис. 13).

Рис. 8. Зависимость угла открытия симистора от управляющего напряжения

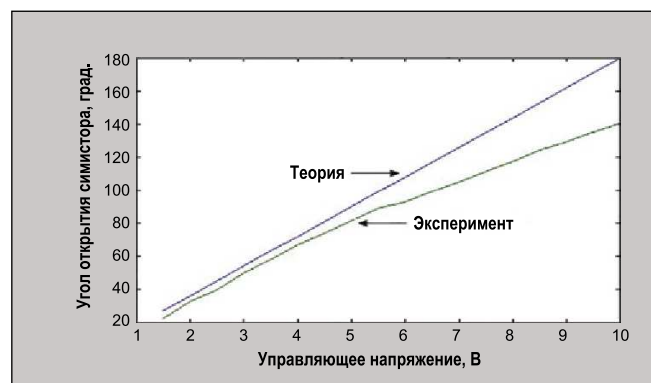


Рис. 9. Зависимость напряжения питания лампы от угла открытия симистора

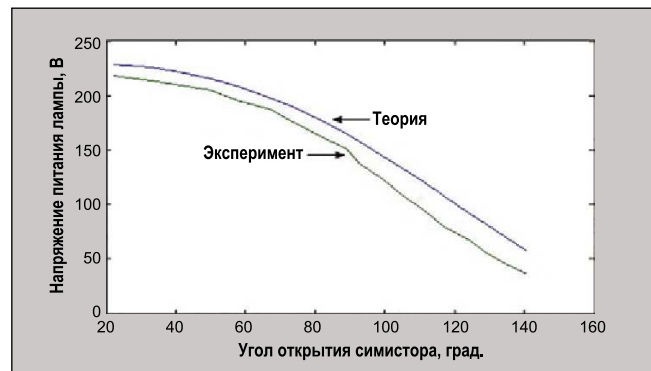


Рис. 10. Форма управляющего сигнала и напряжения на лампе для ТЛЛ при работе в режиме 70 % от максимального светового потока

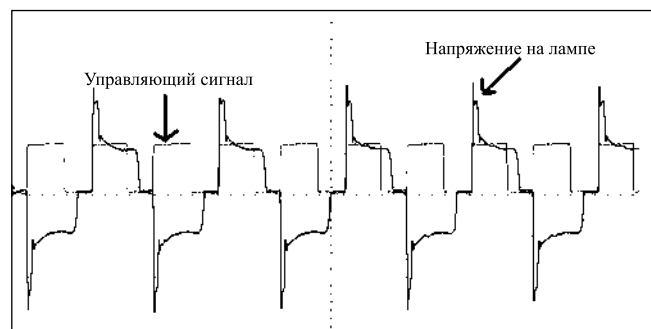
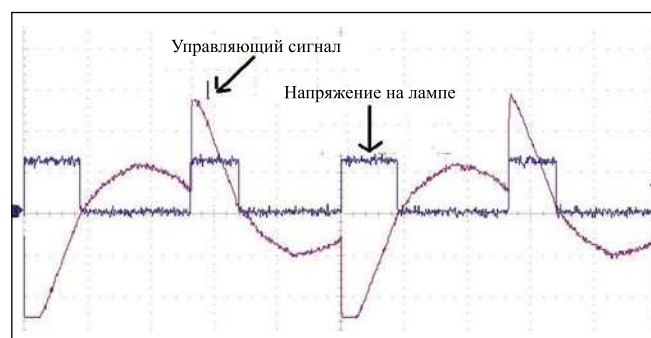


Рис. 11. Форма управляющего сигнала и напряжения на лампе для КЛЛ мощностью 15 Вт при работе в режиме 70 % от максимального светового потока



5.2. Изменение светового потока при изменении опорного напряжения

Был проведён эксперимент для получения значения управляющего напряжения, генерируемого блоком ФР, при разных значениях опорного напряжения, изменяющегося в интервале от 2 до 10 В с целью изменения светового потока ТЛЛ мощностью

36 Вт. Управляющее напряжение регистрировали при различных значениях опорного напряжения. Опорное напряжение можно изменять посредством регулирования сопротивления потенциометра. Отражённая составляющая освещённости, создаваемой интегрирующей сферой, измерялась при помощи прибора *Konica Minolta Chromameter CL 200* при размещении лампы в центре сферы. Пример из-

Рис. 12. Характеристики светорегулирования для разных ламп при использовании разработанного УУО

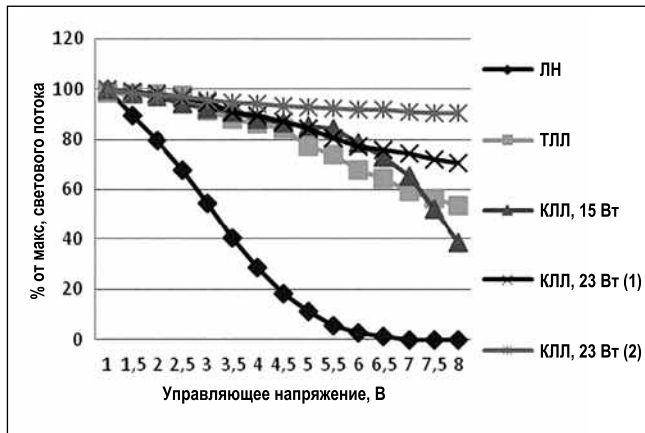


Рис. 13. Зависимость управляющего напряжения от естественной освещённости на ФР

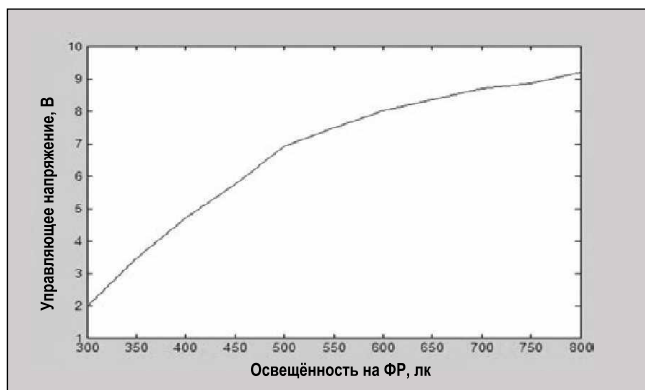


Рис. 14. Зависимость управляющего напряжения от естественной освещённости на ФР при разных значениях опорного напряжения

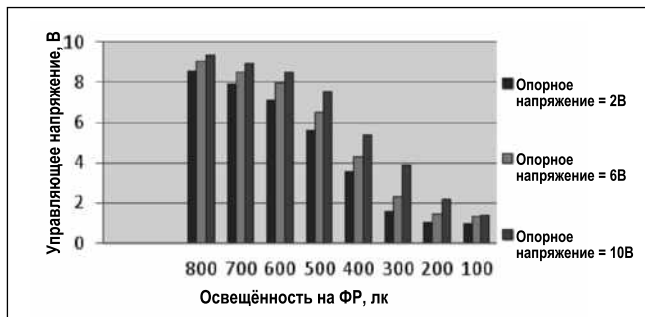
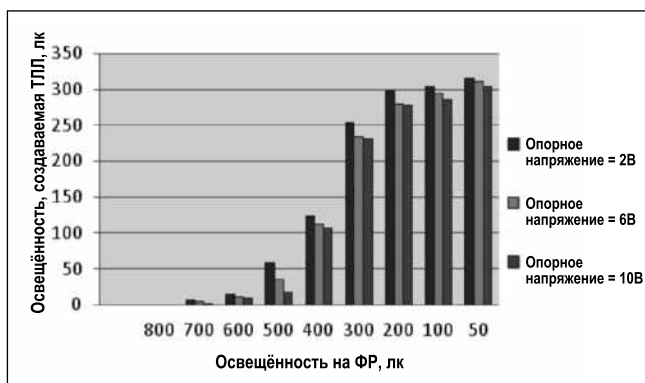


Рис. 15. Зависимость светового потока лампы от естественной освещённости на ФР при различных опорных напряжениях для ТЛЛ



менения управляющего напряжения в зависимости от уровня естественной освещённости показан на рис. 14 для трёх различных значений опорного напряжения. Изменение светового потока ТЛЛ при изменении естественной освещённости на поверхности ФР и при различных значениях

управляющего напряжения также показано на рис. 15.

6. Стоимостной анализ

Компоненты, использовавшиеся при разработке схем, легко доступны на рынке. Сравнение стоимости раз-

личных схем проведено на рис. 16. Поскольку стоимость ИК-датчика больше, чем стоимость датчика с ФР, стоимость Схемы II получается ниже, чем стоимости остальных схем. Сравнение затрат производится применительно к индийским рупиям (*INR*).

7. Обсуждение

Установлено, что у разработанного реагирующего на освещённость УУО с встроенными датчиками с увеличением управляющего напряжения напряжение питания лампы уменьшается, в результате чего световой поток лампы также уменьшается. Управляющее напряжение подаётся от блока ФР. Генерируемое блоком ФР выходное управляющее напряжение повышается с увеличением естественной освещённости, что приводит к уменьшению напряжения питания лампы и, соответственно, к снижению её светового потока. С другой стороны, если уровень естественной освещённости низкий, то выходное управляющее напряжение уменьшается, что приводит к увеличению напряжения питания лампы и, соответственно, к увеличению её светового потока. Следовательно, световой поток лампы увеличивается при увеличении напряжения питания лампы. Если опорное напряжение, установленное для блока ФР, изменяется, то изменяется и управляющее напряжение. При более высоком значении опорного напряжения, которое соответствует более высокому уровню освещённости, реализуется большее значение управляющего напряжения. На рис. 14 видно, что когда опорное напряжение составляет 10 В, то при одном и том же уровне естественной освещённости значение управляющего напряжения больше, чем при более низких уровнях опорного напряжения. При одном и том же уровне естественной освещённости значения управляющего напряжения оказались наименьшими при опорном напряжении, равном 2 В. Выходит, что наименьший световой поток лампы будет получен при наиболее высоком уровне опорного напряжения. Следовательно, когда естественного света меньше, то есть в течение зимнего сезона, или когда естественного света больше, то есть летом, опорное напряжение должно быть соответствующим образом отрегулировано для достижения требуемого уровня освещённости.

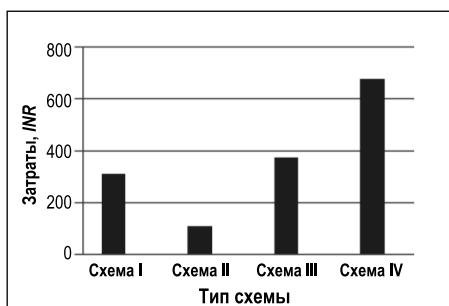


Рис. 16. Сравнение стоимости различных исполнений УО

При этом управляющее напряжение должно быть установлено вручную посредством регулировки сопротивления потенциометра.

8. Заключение

Целью работы была разработка экономичного интегрального УОО, а также оценка функционирования разработанного УОО в небольших помещениях. В работе показано, что степень чувствительности фотодатчика и датчика присутствия можно регулировать с помощью интегрированного средства настройки, имеющегося в разработанной схеме. Источник света можно отключить с помощью разработанного нами простого УОО, чтобы уменьшить потери электроэнергии при отсутствии людей или при присутствии людей в условиях достаточной естественной освещённости. УОО может уменьшать световой поток ламп, используемых для общего внутреннего освещения, в зависимости от уровня естественной освещённости. Кроме того, имеется возможность изменять световой поток в зависимости от сезонных изменений естественной освещённости за счёт выбора опорного напряжения. Система будет более эффективной, если применять управление освещением в отдельных зонах помещения. Для полного понимания работы лампы с использованием разработанного УОО необходимо ещё одно подробное исследование. Управление имеющимися в продаже светодиодами возможно после внесения в описанную схему некоторых изменений. Эффективность этой системы применительно к управлению светодиодными лампами в данной статье не затрагивалась. В качестве примеров приведены результаты только для ТЛЛ и КЛЛ. Эта система может быть применена во внутренних помещениях для регистрации присутствия че-

ловека и энергосбережения за счёт использования естественного света.

Эта работа является частью магистерской диссертации в области светотехники, выполненной первым автором. Мы благодарны г-же Дебжани Гангули (*Debjani Ganguly*), доценту кафедры электротехники Индийского института инженерных наук и технологий, г. Шибпур, и доктору Бисвенду Чаттерджи (*Biswendu Chatterjee*), доценту кафедры электротехники Джадавпурского университета, за ценные предложения по выполнению этой работы.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Shashi, R.V.* Energy Markets And Technologies In India // Keynote Address in Global Energy Dialogue at Hanover (Germany). – April 25, 2006.
2. *Slater, A.I.* Lighting and Energy in Buildings // 23rd Session of the CIE, New Delhi, 1995. – Vol. 1.
3. *Rubinstein, F., Siminovitch, M., Verd-erber, R.* Fifty Percent Energy Savings with Automatic Lighting Control // IEEE Transactions on Industry Applications. – 1993. – Vol. 29, No. 4. – P. 768–773.
4. *Fraden, J.* Handbook of Modern Sensors: Physics, Designs, and Applications. Fourth Edition. – 2010.
5. *Guo, X., Tiller, D.K., Henze, G.P., Waters C.E.* The performance of occupancy-based lighting control systems // Lighting Research and Technology. – 2010. – Vol. 42. – P. 415–431.
6. *Tiller, D.K., Guo X., Henze G.P., Waters C.E.* Validating the application of occupancy sensor networks for lighting control // Lighting Research and Technology. – 2010. – Vol. 42. – P. 399–414.
7. *Newsham, G.R., Aries, M.B.C., Mancini, S., Faye, G.* Individual control of electric lighting in a daylight space // Lighting Research and Technology. – 2008. – Vol. 40. – P. 25–41.
8. *Rubinstein, F., Siminovitch, M., Verd-erber R.* Fifty Percent Energy Savings with Automatic Lighting Control // IEEE Transactions on Industry Applications. – 1993. – Vol. 29, No. 4. – P. 768–773.
9. Lighting Handbook Reference & Application. – Illuminating Engineering Society of North America, Ninth Edition. – 2000.
10. *Kim S., Mistrick R.* Recommended Daylight Conditions for Photosensor System Calibration in a Small Office // Journal of the Illuminating Engineering Society. – 2001. – Vol. 30, No. 2. – P. 176–188.
11. *Mistrick, R.G., Sarkar, A.* Daylight-Responsive Photosensor Control in

Classrooms with Different Daylight Delivery Systems // IESNA Annual Conference in Tampa, Florida. – July 2004.

12. *Bierman, A., Conway K.M.* Characterizing Daylight Photosensor System Performance to Help Overcome Market Barrier // Journal of the Illuminating Engineering Society. – 2000. – Vol. 29, No. 1. – P. 101–115.

13. *Kinney, L.* Practical Control Strategies for Harvesting Daylight Savings // E Source Emerging Technology Series, ER-00-13. – July 2000.

14. *Slater, A.I.* Lighting and Energy in Buildings // 23rd Session of the CIE, New Delhi, 1995. – Vol. 1.

15. *Rubinstein, F., Avery, D., Jennings, J.* On the Calibration and Commissioning of Lighting Controls // Right Light Conference, Copenhagen, Denmark. – 1997.

16. *Kim, S., Mistrick, R.* Recommended Daylight Conditions for Photosensor System Calibration in a Small Office // Journal of the Illuminating Engineering Society. – 2001. – Vol. 30, No. 2. – P. 176–188.

17. http://www.lighting.philips.com/pwc_li/main/products/controls/assets/actilume1-10V-applicationguide-v2fin2-new.pdf.

18. http://www.lighting.philips.com/pwc_li/main/products/controls/assets/actilume%20wireless1-10v-oem-applicationguide-dec2012-new.pdf.

19. http://www.lighting.philips.com/pwc_li/main/products/assets/pdf/Actilume_DALI_Gen2_ApplicationGuide-V4_Apr-2014.pdf.

20. http://www.lighting.philips.com/pwc_li/main/products/assets/pdf/Actilume_OEM_ApplicationGuide_V2Fin.pdf.



Сангита Сахана (Sangita Sahana). М.Е. (2012 г.). Доцент Джадавпурского университета, Индия



Бисванат Рой (Biswanath Roy), Ph.D. (1999 г.). Профессор Джадавпурского университета, Индия. Почтенный член Индийского светотехнического общества и Общества инженеров (Индия)

interlight
RUSSIA

intelligent building
RUSSIA

Международная выставка электротехники,
светотехники и автоматизации зданий

10–13 сентября 2019

ЦВК «Экспоцентр»
Москва

Light



Технический свет



Декоративный свет



Компоненты



Лампы



LED-технологии

Building



Электротехника



Автоматизация зданий



Умный дом



Интегрированные системы безопасности



Умный город



messe frankfurt

Обследование состояния исторических светопрозрачных конструкций 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 статье приведены результаты второй части обследования светопрозрачных конструкций ГМИИ им. А.С. Пушкина – светопрозрачных покрытий (фонарей верхнего света). Конструкции являются памятником культуры федерального значения и подлежат государственной охране. По результатам проведения комплексного обследования сделаны выводы о неудовлетворительном состоянии данных конструкций и подготовлены материалы для разработки рекомендаций по их реставрации.

Ключевые слова: светопрозрачное покрытие, фонарь, сопротивление теплопередаче, тепловой режим, конденсат, металлические конструкции.

В первой половине 2018 г. НИИСФ РААСН проводил обследование исторических окон 1-го этажа главного здания ГМИИ им. А.С. Пушкина (далее – ГМИИ) [1–3]. Настоящая статья посвящена продолжению обследований исторических светопрозрачных конструкций музея, а именно – оценке состояния светопрозрачных покрытий [4].

Рис. 1 наглядно демонстрирует всю масштабность светопрозрачных покрытий главного здания ГМИИ им. А.С. Пушкина.

Такие развитые крыши весьма характерны для художественных музеев. На рис. 2, для примера, показано здание Музея изящных искусств в г. Лилль (Франция), построенное в 1897 г. (на 15 лет раньше главного здания ГМИИ). В 1990-е гг. музей был удачно отреставрирован и вновь открыт в 1997 г. Таким образом, лилльский музей становится некоторым ориентиром в реставрации ГМИИ на ул. Волхонка.

Необходимость таких светопрозрачных покрытий в художественных музеях обосновывается тем, что боль-

шинство произведений изобразительного искусства наиболее выигрышно выглядит при естественном освещении [5]. Основы естественного освещения зданий (в том числе зданий музеев) были разработаны ещё в середине прошлого века [6, 7], и практически все современные галереи максималь-

но оснащены фонарями верхнего света. На рис. 3 показаны залы ГМИИ и Дворца изящных искусств в Лилле. Очевидны общие тенденции освещения экспонатов в этих зданиях.

В связи с принятием решение о здании на ул. Волхонка и прилегающих улицах Музейного квартала ГМИИ были переданы близлежащие здания, где – как и в главном здании – проводится масштабная реконструкция, частью которой должно стать восстановление работоспособности светопрозрачных покрытий (фонарей верхнего света).

Исследования, проведённые специалистами НИИОСП им. Н.М. Герсеванова в 2014–2015 гг. [8], показали, что конструкции светопрозрачного покрытия главного здания ГМИИ нахо-

Рис. 1. Макет главного здания ГМИИ



Рис. 2. Музей изящных искусств в Лилле



Рис. 3. Системы верхнего естественного освещения музеев:
а – один из главных залов ГМИИ; б – аналогичный зал Дворца изящных искусств в Лилле

Рис. 4. Узел стропильной балки со следами коррозии



Рис. 5. Разрез светопрозрачного покрытия

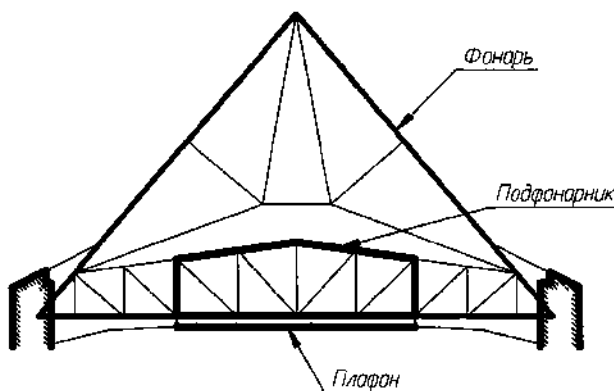


Рис. 6. Внешний вид светопрозрачного покрытия в 2018 г.



Рис. 7. Элементы конструкции фонаря в 2018 г.

дятся в неудовлетворительном состоянии. В частности, было выявлено 65 аварийных и 11 ограниченно работоспособных участков.

Преимущественно аварийные участки – места сильной (до 100 %) коррозии соединительных фасонных полок уголков и наклонных элемен-

тов крепления ферм к стенам здания, срыв болтов. Основное расположение подобных мест – в углах здания, вблизи ендов и в коньковой части ферм.

Для иллюстрации выводов обследования [8] приведём только один пример – показанный на рис. 4.

Светопрозрачное покрытие музея имеет три контура: основной (фонарь); подфонарный (подфонарник); нижний (плафон с рассеивающим стеклом над экспозиционными залами).

Все контуры сегодня выполнены из одинарного стекла, закреплённого в металлических таврах (рис. 5). Все конструкции создавались при строительстве музея в начале прошлого века (некоторые реставрационные работы проводились в 1960–1970-х гг.). На рис. 6 представлен современный внешний вид светопрозрачного покрытия музея.

Светопрозрачные конструкции (по крайней мере, фонаря и плафона), установленные в главном здании ГМИИ, как и большинство других строительных конструкций в нём, являются предметом государственной охраны, и их полная замена невозможна по закону. Каждая составляющая часть светопрозрачного покрытия ниже рассмотрена отдельно.

Сегодняшнее состояние элементов конструкции основного контура светопрозрачного покрытия музея (**фонарь**) показано на рис. 7.

Кратко резюмируя результаты нашего обследования, можно отметить следующее:

- скаты крыши выполнены из фрагментов стёкол толщиной 4 мм (средний размер фрагментов стёкол 415 × 1110 мм), угол наклона к горизонту 50°;
- стёкла расположены на профиле таврового сечения (35 × 35 × 3 мм), которые опираются на горизонтальные стальные уголки (90 × 10 мм);
- основные фермы выполнены из двух сваренных (свинченных?) между собой П-образных швеллеров так, что фактически получается двутавр;
- общие размеры сечения фермы – ширина 150 мм, высота 140 мм, толщина от 5 до 7 мм (в зависимости от толщины нанесённой за прошедшие 100 лет краски);
- расстояние между фермами не совсем одинаково и в среднем составляет 2850 мм;
- высота конька основного остекления треугольного фонаря от пола чердака составляет около 8000 мм, а полуцилиндрического – 10000 мм;
- стёкла расположены с нахлёстом верхнего стекла на нижнее (по типу черепицы) с небольшим просветом, что обеспечивает как дополнительную вентиляцию, так и естественный

отвод конденсата, образующегося на внутренней поверхности стекла (идея В.Г. Шухова);

- крепление стёкол к горизонтальным стальным уголкам производится с помощью кляммеров, выполненных из листовой стали;

- стык стекла и таврового профиля заделан герметиком (в некоторых местах замазкой) некачественно, имеются щели, через которые проникают осадки;

- вентиляция подстекольного пространства осуществляется за счёт «продыхов», выполненных из листовой стали, внизу ската кровли (шаг – через один сегмент);

- конёк крыши имеет массу следов протечек и некачественных латаний (рис. 8);

- на остеклении фонаря видны многочисленные следы протечек, а также разбитые стёкла;

- при проведении текущих ремонтов остекления фонаря на некоторых участках кровли стекло было заменено фанерными листами и (или) оцинкованным железом (рис. 8);

- остекление фонаря грязное и не обслуживалось долгое время, что значительно снижает его светотехнические качества.

Схематично элементы остекления фонаря показаны на рис. 9.

Второй контур остекления светопрозрачного покрытия (*подфонарник*) в треугольных конструкциях характеризуется следующими размерами: ширина по низу – от 4000 до 7000 мм, высота по краю – 970 мм, высота по центру – 1410 мм. (В полуцилиндрических фонарях размеры подфонарника несколько меньше.) Остекление подфонарника осуществлено одинарным стеклом толщиной 5–6 мм, которое установлено в тавры, аналогичные используемым на основном контуре светопрозрачного покрытия.

Угол наклона горизонтального остекления подфонарника – от 10 до 15 ° к горизонту.

Современное состояние остекления подфонарника совершенно не соответствует его предназначению – обеспечению естественного освещения экспозиционных залов. Именно поэтому в пространстве между рассеивающим плафоном и подфонарником установлены многочисленные дополнительные источники света (рис. 10).

В настоящий момент для исключения протечек в основные залы весь



Рис. 8. Конёк светопрозрачного покрытия фонаря и следы ремонтов

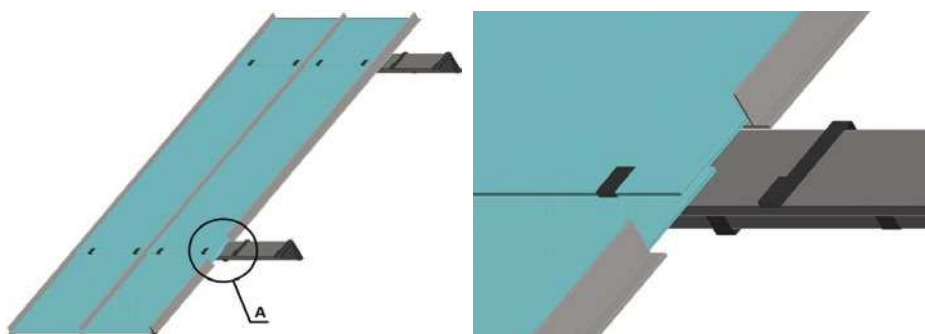


Рис. 9. Крепление элементов остекления фонаря к горизонтальным направляющим



Рис. 10. Внутреннее пространство и внешний вид подфонарника

подфонарник закрыт тканью, полимерной плёнкой и пр. (рис. 10).

Из-за постоянных протечек профили, на которых лежит остекление подфонарника, проржавели и нуждаются в замене и (или) глубокой зачистке и покрытии специальными составами.

Рассеивающее матовое стекло (с довольно плотным матированием) в *плафоне* установлено горизонтально на таких же металлических таврах сечением 35 × 35 × 3 мм, как и в остальных контурах светопрозрачного покрытия (рис. 11). Как оно смотрится из экспозиционных залов, показано на рис. 3, а.

С целью определения теплотехнически однородных зон обследуемой светопрозрачной ограждающей конструкции и обнаружения зон инфильтрации было проведено натурное обследование с помощью тепловизионной съёмки. Для этого использовались тепловизионная камера *NEC TH-9100* и пирометр. Обследование проводилось с учётом требований ГОСТ [9].

Тепловизионная съёмка обследуемой конструкции велась при температуре наружного воздуха $t_n = -4,5$ °C и температуре внутреннего воздуха $t_b = +20$ °C (рис. 12).

В рамках обследования проводились измерения температур свето-

Рис. 11. Внешний вид рассеивающего плафона с осветительными приборами

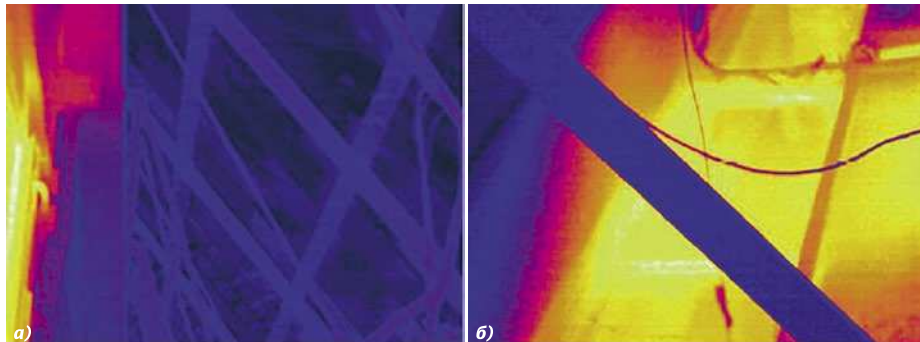
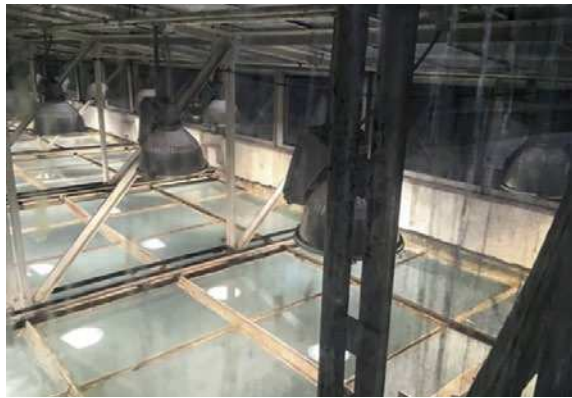


Рис. 12. Термограммы светопрозрачных конструкций: а – фонарь; б – подфонарник и плафон

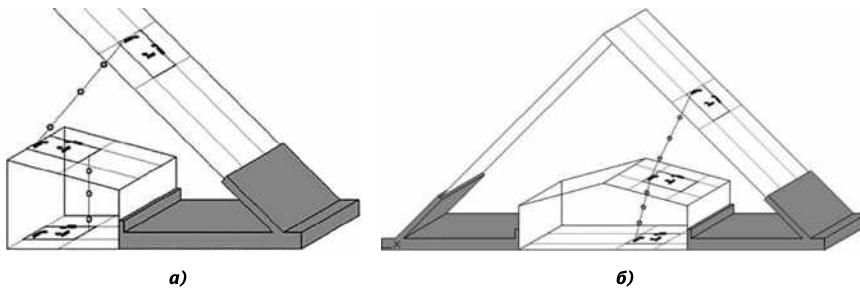


Рис. 13. Схемы расстановки датчиков температуры и теплового потока: а – над залом № 27; б – над залом № 29

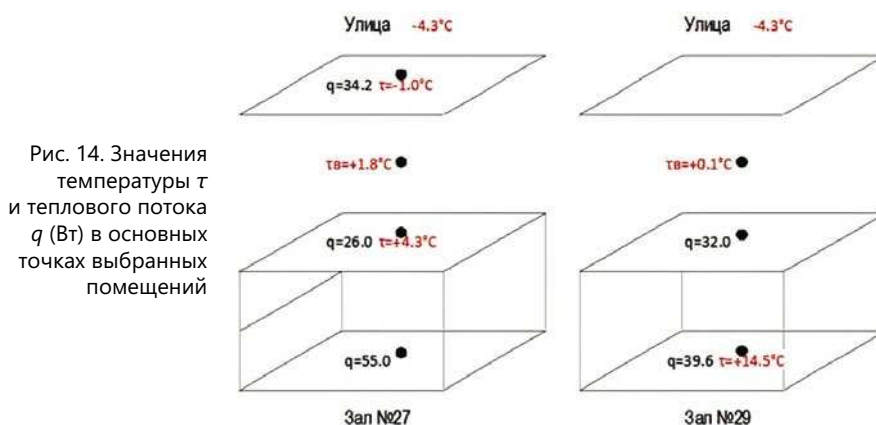


Рис. 14. Значения температуры t и теплового потока q (Вт) в основных точках выбранных помещений

прозрачной конструкции в отдельных зонах над двумя экспозиционными залами (27 и 29) и в самих этих помещениях (при включённых осветительных приборах).

Температура наружного воздуха: $-4,3\text{ }^{\circ}\text{C}$.

На участке над залом № 27 – температура под внешним фонарём: от $+3$ до $+5\text{ }^{\circ}\text{C}$; температура под подфонар-

ником: от $+9$ до $+10\text{ }^{\circ}\text{C}$; температура бокового остекления подфонарника: $+8,6\text{ }^{\circ}\text{C}$.

На участке над залом № 29 температура под внешним куполом: от $+3$ до $+5\text{ }^{\circ}\text{C}$.

На рис. 13 приведены схемы расстановки датчиков, а на рис. 14 – значения температуры и теплового потока в разных точках светопрозрачной конструкции.

Одним из важных выводов обследования, который может использоваться при планировании теплового режима светопрозрачных покрытий при их реставрации, служит то, что разница температуры наружного воздуха и температуры под основным фонарём в подкрышном пространстве составляет $8\text{--}10\text{ }^{\circ}\text{C}$.

С целью определения приведённого сопротивления теплопередаче светопрозрачной конструкции R_0 было проведено натурное испытание с использованием измерителей теплового потока и температуры. Испытания проводились в соответствии с рекомендациями [10, 11].

Полученные оценки R_0 светопрозрачного заполнения фонаря и светопрозрачного заполнения подфонарника $+0,18\text{--}0,20$ и $0,40\text{--}0,45\text{ м}^2\cdot^{\circ}\text{C}/\text{Вт}$ соответственно.

Важный результат этой части обследования, который может использоваться при планировании теплового режима светопрозрачных покрытий при их реставрации, – то, что при совместной оценке остекления подфонарника и плафона R_0 повышается на $0,20\text{--}0,25\text{ м}^2\cdot^{\circ}\text{C}/\text{Вт}$.

По результатам многочисленных натурных обследований исторических конструкций светопрозрачного покрытия главного здания ГМИИ сделаны следующие основные выводы:

1. Светопрозрачные конструкции находятся в очень плохом состоянии (в ряде случаев неремонтопригодном) – ржавчина практически по всем конструкциям, щели, неработающая фурнитура и пр.

2. Характеристики светопрозрачных конструкций (приведённое сопротивление теплопередаче, воздухопроницаемость) не соответствуют действующим нормативным документам.

3. Конденсат, образующийся на внутренних поверхностях светопрозрачных конструкций в холодные периоды года, отрицательно влияет на сохранность конструкций.

4. На конструкциях фонаря, выходящих на восточные, южные и западные фасады главного здания ГМИИ, необходимо предусматривать специальные солнцезащитные устройства и рассеивающие прямой солнечный свет шторы.

5. В связи с планирующейся комплексной реконструкцией музея, созданием Музейного городка на Волхонке и невозможностью замены исторических светопрозрачных конструкций, являющихся предметом культурного наследия и государственной охраны, необходимо разработать мероприятия по повышению их эффективности.

Результаты теплотехнических расчётов разных вариантов повышения эффективности светопрозрачного покрытия и рекомендации по его реставрации будут представлены в следующей статье авторов.

Авторы приносят огромную благодарность сотрудникам НИИСФ РААСН (А. Верховскому, С. Потапову, В. Брызгалину и Е. Даличик) и ООО «ГК «РОБИТЕКС» (Н. Румянцеву и И. Истоминой) за помощь в проведении натурных обследований исторических светопрозрачных конструкций ГМИИ.

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. Спиридонов А.В., Умнякова Н.П. Компьютерное моделирование и рекомендации по реставрации исторических светопрозрачных конструкций ГМИИ им. А.С. Пушкина // Светотехника. – 2019. – № 2. – С. 72–76.

3. Научно-технический отчёт НИИСФ РААСН по теме: «Проведение натурного обследования существующих исторических окон на 1-ом этаже с целью определения возможных причин образования конденсата и разработки рекомендаций по исключению конденсатообразования и разработка комплекса мер по модернизации существующих окон в рамках реставрационных работ для объекта «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)». – М., 2018. – 98 с.

4. 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.

5. Anderson M. Measuring the Dynamic of Contrast & Daylight Variability in Architecture: a Proof of Concept Methodology // Building and Environment. – 2014. – Vol. 81, November. – P. 320–333.

6. Гусев Н.М., Макаревич В.Г. Световая архитектура. – М.: Стройиздат, 1973. – 245 с.

7. Гусев Н.М. Естественное освещение зданий. – М.: Госстройиздат, 1961. – 171 с.

8. Научно-технический отчёт НИИСФ им. Н.М. Герсеванова 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.

9. ГОСТ Р 54852–2011 «Здания и сооружения. Метод тепловизионного контроля качества теплоизоляции ограждающих конструкций».

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

11. ГОСТ Р 54853–2011 «Здания и сооружения. Метод определения сопротивления теплопередаче ограждающих конструкций с помощью тепломера».

«Самокрутящийся момент»: обнаружено новое свойство света

Команда исследователей из Испании и США нашла новое свойство света – «самокрутящийся момент».

В своей статье, опубликованной в журнале *Science*, исследователи описывают, как им удалось обнаружить новое свойство, а также рассказывают о возможном его использовании.

Учёным давно известны многие свойства света, но совсем недавно они обнаружили, что свет также может быть *скручен* – то есть иметь угловой момент. Говорят, пучки света с высоко структурированным угловым моментом имеют орбитальный угловой момент и называются «вихревыми пучками».



Они представляют собой спираль, движущуюся вокруг центра, а при «ударе» о плоскую поверхность вихревые пучки принимают форму пончика.

В новой работе учёные исследовали такие пучки в контексте, в котором никто этого не делал ранее. Эксперименты включали в себя запуск двух лазеров в облако аргона – это заставляло пучки перекрываться. Вследствие этого они соединялись и выходили как один пучок с другой стороны облака аргона. В результате получался вихревой пучок.

Затем исследователи задались вопросом, что произойдёт, если лазеры будут иметь разный орбитальный угловой момент и если они будут немного синхронизированы. В результате получилась балка, похожая на штопор с постепенно меняющимся углом поворота. И когда она ударилась о плоскую поверхность, то стала похожа на полумесяц. Исследователи отметили, что это случилось потому, что один фотон в передней части пучка вращался вокруг своего центра медленнее, чем фотон во внешней части пучка.

Учёные быстро окрестили новое свойство «самокрутящим моментом». Оказалось, это не только недавно обнаруженное свойство света, но и то, которое никогда даже не предсказывалось. Также учёные рассказали о перспективах применения их открытия. По их словам, это может привести к разработке новых устройств, которые используют манипулирование наноразмерными материалами.

naked-science.ru
30.06.2019



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, кандидат 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

Оценка соответствия административного здания требованиям программы LEED¹

И. БАКИР КЮЧУККАЯ¹, У. АЛАКАВУК²

¹ Измирский экономический университет, Измир, Турция. E-mail: idilbakr@hotmail.com

² Университет Яшар, Измир, Турция. E-mail: ebru.alakavuk@yasar.edu.tr

Аннотация

Прогресс в промышленности и технике, начало которому было положено промышленной революцией, привёл к ухудшению экологического равновесия и истощению природных ресурсов. Экологичность, обеспечение которой изначально рассматривалось как решение этой проблемы, стала важной составляющей внутренней архитектуры зданий, учитываемой при их проектировании. Осветительные установки офисов, которые можно считать дополнительными жилыми помещениями, также следует оценивать с точки зрения их экологичности.

В данной работе экономия и перерасход энергии в установках искусственного освещения офиса были оценены в соответствии со стандартом *ASHRAE/IES Standard 90.1–2007* [1]², требования которого входят в критерии оценки освещения программы сертификации *LEED*³. Мощность, потребляемая установками искусственного освещения, измерялась во время работы этих установок. Результаты измерений сравнивались с нормами энергопотребления, что позволило определить размеры экономии или перерасхода энергии. Освещение офиса было оценено на соответствие требованиям *LEED*.

Ключевые слова: офис, освещение, экологичность, энергоэффективность, *LEED*.

1. Введение

Естественное освещение, источником которого является солнце, проектируется таким образом, чтобы оно удовлетворяло требованиям по обеспечению зрительного комфорта.

Некоторые источники света генерируют свет сами. Их называют естест-

венными источниками света, к которым относятся солнце, звёзды, светлячки, молнии, гнилушки и некоторые виды глубоководных рыб [2].

Основной особенностью естественного освещения является его изменчивость. Цвет естественного света изменяется в зависимости от времени суток, чистоты атмосферы и отражения от окружающих объектов. Интенсивность солнечного света изменяется в зависимости от времени суток, дня года и широты места. Яркость неба зависит от состояния неба, которое может быть пасмурным или чистым. В последнем случае результирующая яркость неба может быть обусловлена одним только небом или небом и прямым солнечным светом [3].

Прямой солнечный свет, если его не экранировать, обычно является неподходящим для внутреннего освещения источником света. Это же относится и к светильникам, конструкция которых должна исключать появление блёскости. Необходимо обеспечить контроль прямого солнечного света, поступающего внутрь зданий, что аналогично тому, что при конструировании светильников следует стремиться к уменьшению блёскости [3].

Веками естественное освещение играло важную роль при проектировании зданий. В результате технического прогресса для целей освещения начали использовать электроэнергию, что получило широкое распространение. Благодаря этому архитекторы получили свободу проектирования, хотя и с учётом необходимости бережного расходования энергоресурсов. Поэтому эффективное использование солнечного света и выработка решений, призванных уменьшить расход электроэнергии, стали наиболее важны-

ми проблемами современной архитектуры [4].

Важным для охраны окружающей среды решением стало освещение светодиодами (СД), которое используется для увеличения энергоэффективности.

СД – это источники света, в основе работы которых лежит электролюминесценция, и они очень похожи на обычные полупроводниковые диоды. Свет генерируется в обеднённом слое в результате рекомбинации электронов и дырок, и его спектр зависит от состава полупроводникового материала. Через несколько лет после создания цветных СД появились ещё и белые СД. Белое излучение генерируется не непосредственно СД, а возникает в результате преобразования излучения синего СД покрывающим его люминофором [5].

Требования экологичности довольно поздно проникли из области проектирования в область внутренней архитектуры зданий. Освещение является самым важным объектом при проектировании внутренней архитектуры зданий. Если естественное освещение используется в полном объёме и должным образом при одновременном максимальном сокращении использования искусственного освещения, то это способствует уменьшению как энергопотребления и связанных с выработкой электроэнергии выбросов *CO₂*, так и светового загрязнения. В данной статье показано, что при правильном применении критериев экологичности осветительных установок можно решить многие экономические, социальные и экологические проблемы.

Экологичное проектирование – очень интересная область архитектуры и градостроительства, которая является для них одним из основополагающих моментов. И есть веские причины, чтобы считать «зелёные» или экологичные здания ещё и «высокоэффективными зданиями»: они не только позволяют сократить текущие расходы, но и могут способствовать увеличению производительности труда и улучшению самочувствия живущих и работающих в них людей в результате улучшения качества освещения и воздуха. Если офисные здания проектируют или ремонтируют с учётом требований экологичности, то это положительно сказывается на производительности труда в части улучшения его качества, а уменьшенные количества прогулов может до-

¹ Перевод с англ. Е.И. Розовского

² В настоящее время уже действует новая редакция этого стандарта – *ANSI/ASHRAE/IES Standard 90.1–2016*. – Прим. пер.

³ *LEED (Leadership in Energy and Environmental Design* – Лидерство в энергоэкономичном и экологичном проектировании) – программа по сертификации «зелёных» зданий, которая используется во всём мире. – Прим. пер.

полнить уменьшение счетов за электроэнергию [6].

В данной работе проведена оценка использования искусственного освещения в офисном здании в соответствии с критериями программы сертификации *LEED*. В качестве объекта исследования был выбран офис компании *Denge* в г. Измире, который был спроектирован архитектурной компанией *MATT*. Экономия или перерасход энергии офисными установками искусственного освещения были сначала рассчитаны, а затем разделены по секциям и типам в соответствии со стандартом [1], требования которого входят в критерии оценки освещения программы сертификации *LEED*.

1.1. Программа *LEED* и освещение

Связанные с глобальным потеплением экологические проблемы увеличивают значимость поиска путей уменьшения выбросов углекислого газа. Результаты различных исследований говорят о том, что здания ответственны за примерно 40 % мирового выброса CO_2 . Поэтому во всём мире принимаются программы сертификации «зелёных» зданий, призванные уменьшить связанные со зданиями выбросы CO_2 и отрицательно влияющие на окружающую среду [7].

Программа *LEED* (*Leadership in Energy and Environmental Design* – Лидерство в энергоэкономичном и экологичном проектировании) была разработана Советом по экологичному строительству США и является самой известной системой оценки коммерческих зданий. *LEED* включает в себя несколько категорий оценки, применимых к разным моментам жизненного цикла зданий [8].

В рамках этой программы для обеспечения выполнения требований к искусственной окружающей среде здание классифицируют в соответствии с его типом, и для целей сертификации были предложены 9 типов зданий: новые здания, существующие здания, коммерческие здания, здания без отделки, школы, торговые помещения, здания системы здраво-

охранения (*health buildings*), жилые дома и центры градостроительства (*urban development center*). Информация, требующаяся для сертификации здания, зависит от системы сертификации и типа здания, и для всех параметров задаются определённые значения [9].

В версии 4 *LEED* [10] предусмотрены четыре категории оценки освещения:

- Уменьшение светового загрязнения.
- Оптимизация энергоэффективности.
- Внутреннее освещение.
- Прогрессивные методы измерения энергопотребления.

1.1.1. Уменьшение светового загрязнения

В проекте освещения следует избегать как попадания света наружных светильников на соседнюю территорию, так и образования свечения неба при работе светильников, расположенных как внутри, так и вне здания [11].

В *LEED2009*⁴ критерии оценки попадания света на соседнюю территорию включали выраженные в фут-свечах максимальные значения горизонтальной и вертикальной освещённостей, которые зависели от световой зоны, без подробных пояснений того, как эти данные следует регистрировать. Кроме того, к горизонтальной освещённости предъявлялось требование, чтобы она была меньше чем 0,1 фут-свечи (1,08 лк), а это означает, что в случае высокоэнергетической установки, создающей освещение, близкое к границе допустимого программой *LEED*, это требование почти невозможно удовлетворить, даже если внутреннее освещение будет очень хорошим и благоприятным для ночного неба. В версии 4 *LEED* [10] содержится только требование к вертикальной освещённости с указаниями относительно того, как строить расчётные сетки; кроме того, эти требования можно удовлетворить, используя осветительные приборы подходящего класса по *BUG*⁵ [12].

1.1.2. Оптимизация энергоэффективности

Этот критерий должен обеспечить более хорошую, чем предусмотренная стандартами, энергоэффективность в целях уменьшения отрицательных экологических и экономических последствий избыточного расходования электроэнергии [10].

Требования к административным зданиям (от маленьких до средних) соответствуют рекомендациям по 50-процентной экономии энергии в подобных зданиях, которые были разработаны Американской Ассоциацией инженеров по отоплению, охлаждению и кондиционированию воздуха (*ASRAE50 % advanced energy design guide*). Этот критерий охватывает [10]:

- Непрозрачные конструктивные элементы здания: крыши, стены, полы, перекрытия, двери и препятствия для потоков воздуха (*continuous air barrier*) (1 балл).
- Прозрачные конструктивные элементы здания: вертикальные оконные проёмы (1 балл).
- Внутреннее освещение, включая естественное освещение и внутреннюю отделку здания (1 балл).
- Наружное освещение (1 балл).
- Подключённые к сети электрические приборы, включая оборудование и устройства управления (1 балл).

1.2.3. Внутреннее освещение

Этот критерий включает в себя использовавшийся ранее критерий «Управляемость систем – освещение» (*IEQ 6.1*), дополненный требованием, чтобы помещения были оборудованы двухуровневыми выключателями (*bi-level switching*) [12].

1.2.4. Прогрессивные методы измерения энергопотребления

Этот критерий предназначен для содействия управлению энергопотреблением и выявления возможностей для дополнительной экономии энергии за счёт отслеживания потребления энергии на уровне здания в целом и отдельных систем в частности. Требование состоит в том, чтобы реализовать прогрессивные методы измерения энергии применительно к [10]:

- Источникам энергии, используемой во всём здании в целом.

⁴ Этот документ в списке литературы отсутствует. – Прим. пер.

⁵ *BUG* (*Backlight, Uplight, and Glare* – свет в заднюю полусферу, свет в верхнюю полусферу и блёскость) – показатель, разработанный Северо-американским светотехническим обществом и Ассоциацией тёмного неба для оценки света, распространяющегося в нежелательных направлениях от светильников наружного освещения. – Прим. пер.



Рис. 1. Помещения офиса компании *Denge* (фотоархив Идил Бакир, 2015 г.)

- Любым индивидуальным конечным потребителям энергии, расходуящим 10 или более процентов от общего годового потребления энергии в здании.

2. Оценка административного здания: офис компании *Denge* в г. Измире

Denge – это сертифицированная консультационная компания, расположенная в г. Измире на 13-м этаже здания *Punta Residence*. Планировка рабочих зон должна была обеспечить комфорт и хорошие условия работы для 35 человек.

Этот офис включает в себя кабинеты, офисы с открытой планировкой, конференц-зал, кухню, туалеты, приёмную, коридоры, кладовую и техническое помещение. Для этих помещений и были спроектированы осветительные установки.

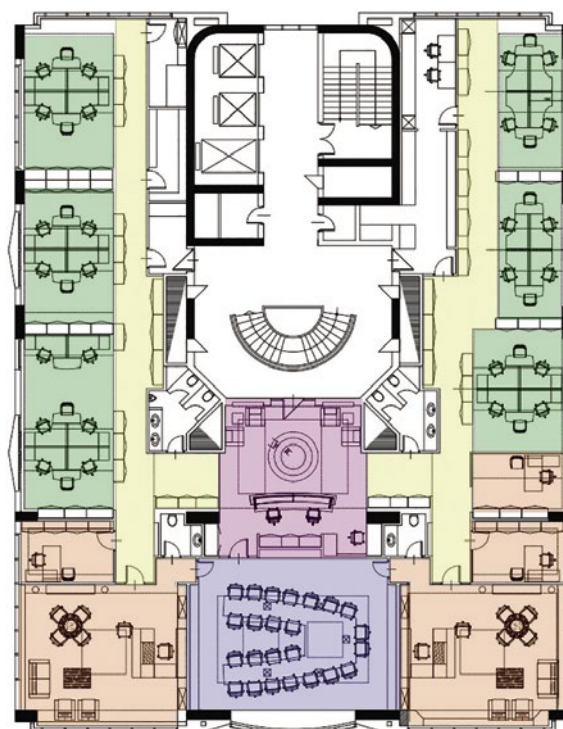
Естественное и искусственное освещение офиса компании *Denge* проектировались одновременно. Местоположение здания очень способствует использованию естественного освещения (рис. 1). Для искусственного освещения из эстетических соображений использовались концентрирующие свет («точечные») светильники типа *spotlight* (далее - точечные светильники). В качестве источников света в них использовались светодиоды, что позволило уменьшить затраты энергии на освещение. Эти светильники располагались над каждым из ра-

ботников, что обеспечивало комфортные условия для работы и исключало блёккость. В коридорах, приёмной и кабинетах использовались подсвечивающие картины настенные светильники, которые не только обеспечивали хорошее эстетическое восприятие, но и освещали коридоры [13].

Помещения, для которых рассчитывались освещение и энергопотребление, показаны на плане офиса (рис. 2).

Схема освещения офиса компании *Denge* приведена на рис. 3. Перед каждым из столов открытого офиса находится подвесной потолок (*drop ceiling*), в котором размещён точечный светильник. Миниатюрные точечные светильники с СД расположены также и над стенными шкафами. В кабинетах использовались светильники шести типов. Это круглые и квадратные точечные светильники, настенные (освещающие картины) светильники, потолочные светильники двух типов и ленточные светильники с СД. Над рабочим столом расположены точечный и потолочный светильники. В ложном потолке расположены скрытые источники света – ленточные светильники с СД. Ещё один потолочный светильник расположен над столом для заседаний и над кофейным столиком. В конференц-зале используется большое количество точечных светильников. Он имеет подвесной потолок, в котором расположены скрытые источники света. Местоположения светильников соответствуют расположению стульев

Рис. 2. План офиса компании *Denge*



- Открытый офис
- Кабинет
- Приёмная
- Коридор
- Конференц-зал

Осветительная установка офиса компании *Denge*

	Светильник	Номинальные размеры см	Источник света	Мощность, Вт	Световой поток, лм	Напряжение, В	Номинальный ресурс, ч
Освещение открытых офисов	<i>NASSA Led Spotlight</i>	19,5 (радиус)	СД	18	2000	85–265	50000
	<i>NASSA Led Spotlight</i>	15,5 (радиус)	СД	20	2000	86–265	50000
Освещение кабинетов	<i>NASSA Led Spotlight</i>	13x13x8	СД	20	2000	85–265	50000
	<i>NASSA Led Spotlight</i>	15,5 (радиус)	СД	20	2000	86–265	50000
	<i>NASSA Jupiter Ceiling lighting</i>	35x35x37	Лампа Energy Smart Bulb	40	475	220–240	8000
	<i>PHILIPS</i>	206x117x5	ЛЛ	28	2900	230	24000
	<i>NASSA Wall Fixture</i>	53x52x29	4xE4	2x20	2000	230	24000
	<i>NASSA Band LED Lighting</i>	16 м	3x300 СД	14,4 (1 м)	475	12	24000
Освещение конференц-зала	<i>NASSA Led Spotlight</i>	19,5 (радиус)	СД	18	2000	85–265	50000
	<i>NASSA Led Spotlight</i>	15,5 (радиус)	СД	20	2000	86–265	50000
	<i>NASSA Band LED Lighting</i>	16 м	3x300 СД	14,4 (1 м)	475	12	24000
Освещение приёмной	<i>NASSA POWER LED</i>	Радиус 5	СД	1	130–150	3–4	10000
	<i>NASSA LED SPOTLIGHT</i>	15,5 (радиус)	СД	20	2000	86–265	50000
	<i>NASSA Jupiter Ceiling lighting</i>	35x35x37	Лампа Energy Smart Bulb	40	475	220–240	8000
	<i>NASSA Wall Lighting</i>	10x10x18	ГЛН	20	320	12	2000
	<i>NASSA Spotlight</i>	6x6x8	СД	20	2000	86–265	50000
	<i>NASSA Band LED Lighting</i>	16 м	3x300 СД	14,4 (1 м)	475	12	24000
Освещение коридоров	<i>NASSA Wall Fixture</i>	53x52x29	4xE4	2x20	2000	230	24000
	<i>NASSA Led Spotlight</i>	15,5 (радиус)	СД	20	2000	86–265	50000
	<i>NASSA Wall Fixture</i>	10x10x18	ГЛН	20	320	12	2000

и столов. В приёмной офиса компании *Denge* имеется подвесной потолок с 18-ю мощными СД (1 Вт) и скрытыми источниками света. Над столами приёмной расположены потолочные и настенные светильники. По бокам от двери расположены две ниши

с точечными светильниками. Во всех коридорах используются светильники с СД. Там также используются настенные светильники и подвесной потолок со скрытыми источниками света. Над шкафами расположены точечные светильники (табл. 1).

Суммарные значения мощности, расходуемой на освещение в каждом из помещений, делили на площади. Как следует из табл. 2, для открытых офисов 1, 2, 3, 4, 5 и 6 экономия расходуемой на освещение энергии составила, соответственно, 68, 31, 41,

Анализ потребления энергии в открытых офисах и кабинетах компании *Denge*

Помещение	Площадь, м ²	% от общей площади	Требования стандарта [1]		Подводимая мощность, Вт	Экономия/перерасход, %
			Вт/м ²	Вт		
Кабинет № 1	49	6	12	588	933	-59
Кабинет № 2	49	6	12	588	933	-59
Кабинет № 3	12	2	12	144	170	-18
Кабинет № 4	12	2	12	144	80	-18
Кабинет № 5	12	2	12	144	170	-18
Открытый офис № 1	34	4	12	408	132	68
Открытый офис № 2	28	4	12	336	232	31
Открытый офис № 3	30	4	12	360	212	41
Открытый офис № 4	25	3	12	300	132	56
Открытый офис № 5	20	3	12	240	212	12
Открытый офис № 6	20	3	12	240	112	53

56, 12 и 53 %, а в кабинетах 1, 2, 3, 4 и 5 имел место перерасход энергии на, соответственно, 59, 59, 18, 18 и 18 %. В конференц-зале перерасход энергии составил 21 %, в приёмной – 9 %, а в коридорах – 100 % (см. табл. 3, где проведено сравнение удовлетворяющего требованиям *ASHRAE* энергопотребления и реального потребле-

ния энергии в офисе). Общая экономия энергии в офисе компании *Denge* составила 3 %, что слишком мало по сравнению с 10 %, требующимися для получения сертификата *LEED*.

Не имеющее сертификата освещение офиса компании *Denge* было проанализировано на предмет его экологичности и расходуемой на освеще-

ние энергии. Согласно результатам, представленным в табл. 2, экономия энергии в этом офисе составила всего лишь 3 %. И хотя офис компании *Denge* нельзя считать экологичным, экономия энергии в нём всё же обеспечена, причём исключительно благодаря использованию эффективных источников света.

Согласно требованиям программы сертификации *LEED*, в случае административных зданий общего назначения критерием оптимизации энергопотребления является экономия 10 % энергии. Офис компании *Denge* этому требованию не удовлетворяет, потребляя энергии больше, чем требуется. Согласно полученным результатам, в конференц-зале и коридорах потребляется слишком много энергии. Это, в первую очередь, относится к коридорам, в которых настенные и точечные светильники потребляют на 100 % больше энергии, чем допустимо.

В табл. 4 приведены критерии оценки освещения в соответствии с программой *LEED* и степень соответствия этим критериям освещения офиса компании *Denge*. Экологичность офисного здания включает в себя удовлетворение всех критериев оценки освещения, таких как управляемость осветительной установки, качество внутреннего освещения, оптимизированное энергопотребление, естественное освещение и вид наружу, а в случае офиса компании *Denge* это не так. В офисе компании *Denge*

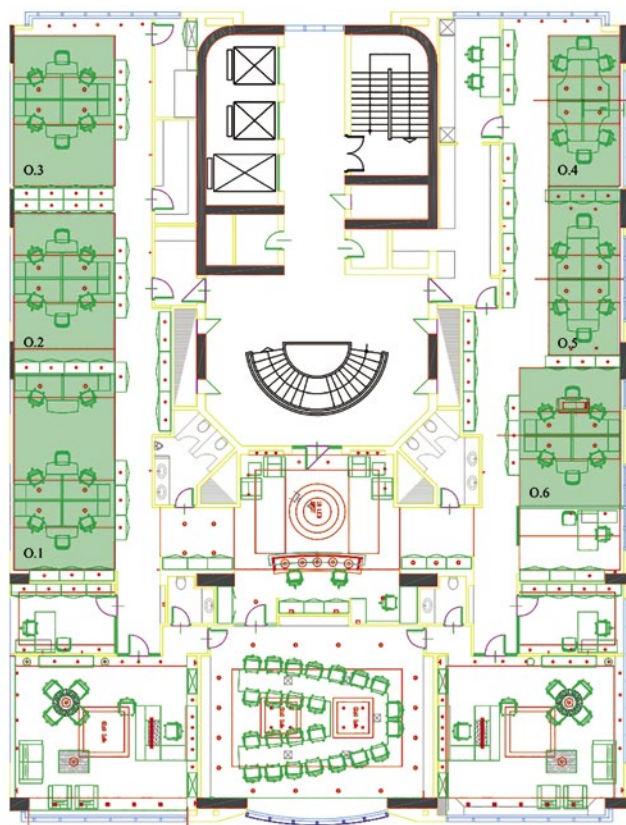


Рис. 3. Схема освещения офиса компании *Denge*

Экономия (–) или перерасход (+) энергии на освещение в помещениях компании *Denge*

Помещения	Площадь, м ²	% от общих энергозатрат	Требования стандарта [1]		Подводимая мощность, Вт	Экономия/перерасход, %
			Вт/м ²	Вт		
Открытые офисы	157	20	12	1884	1032	–45
Кабинеты	134	17	12	2278	2286	+0,3
Конференц-зал	65	8	11	715	872	+21
Коридоры	102	13	5	510	1025	+100
Приёмная	45	6	14	630	691	+9
Прочие	297	37	10	2970	2820	–5
Всего	800	100	–	8987	8726	–3

Таблица 4

Оценка освещения офиса компании *Denge* согласно критериям экологичности программы *LEED*

Показатель	Описание	
<i>SS Credit 8</i>	Уменьшение светового загрязнения	Не рассматривается
<i>EA Prerequisite 2</i>	Минимальное энергопотребление	Достигнуто равное 3 % уменьшение затрат энергии на освещение
<i>EA Credit 1</i>	Оптимальное энергопотребление	Достигнуто равное 3 % уменьшение затрат энергии на освещение
<i>IEQ Credit 6.1</i>	Управляемость – освещение	Установки искусственного освещения неуправляемы
<i>IEQ Credit 8.1</i>	Естественное освещение и вид наружу – естественное освещение	Недостаточное
<i>IEQ Credit 8.2</i>	Естественное освещение и вид наружу – вид наружу	Недостаточное
<i>Pilot Credit 22</i>	Внутреннее освещение – качество	Недостаточное

установки искусственного освещения неуправляемые, и в результате он не удовлетворяет требованиям программы сертификации *LEED* [13].

3. Заключение

В данной работе представлены результаты оценки экономии и перерасхода энергии офисными установками искусственного освещения, проведённые в соответствии со стандартом *ASHRAE/IES90.1–2007* [1], на котором основаны критерии оценки освещения программы сертификации *LEED*. Энергия, расходуемая на искусственное освещение в офисе компании *Denge*, рассчитывалась применительно к полностью включённому освещению

Проведённые оценки показали, что для открытых офисов экономия энергии составила 45 %, тогда как в кабинетах имел место равный 0,3 % перерасход энергии. Благодаря индивиду-

альному управлению искусственным освещением с использованием датчиков естественной освещённости, значительно уменьшился перерасход энергии в конференц-зале офиса компании *Denge*, составивший в результате 21 %. В приёмной и коридорах перерасход энергии составил, соответственно, 9 и 100 %, а это довольно плохо как с экономической, так и с экологической точек зрения. Энергосбережение в коридорах явно неудовлетворительное, что обусловлено плохим выбором светильников и требует проведения дополнительных исследований.

Офис компании *Denge* удовлетворяет только требованиям в части оконных проёмов и внутренней компоновки. С точки зрения энергосбережения самым важным является выбор подходящих и эффективных светильников. В результате использования неподходящих светильников, в коридорах, конференц-зале и приёмной

офиса компании *Denge* наблюдается значительный перерасход расходуемой на освещение энергии. Осветительные установки должны быть регулируемые и снабжены датчиками естественной освещённости. Лампы, используемые в осветительных установках, следует заменить на СД источники света. В коридорах, в которых наблюдается наибольшее избыточное потребление энергии, точечные и настенные светильники следует заменить на светильники с СД, потребляющие меньше энергии. В приёмной надо уменьшить количество точечных светильников, а используемые в них лампы следует заменить на СД источники света. В кабинетах также надо уменьшить количество точечных светильников, а что касается индивидуального освещения, то следует отдать предпочтение менее энергоёмким светильникам. Подобным образом можно оптимизировать энергоэффективность освещения офиса. В результате пере-

станут уставать глаза работников, исчезнет блёскость экранов и увеличится производительность труда в офисе.

Как следует из критериев оценки программы *LEED*, важное значение имеет управление освещением. В зданиях следует предусмотреть возможность управления освещением, и осветительные установки должны быть подключены к общей автоматической системе управления. Следует использовать СД источники света, что приведёт к значительной экономии энергии в установках искусственного освещения. Применение этих критериев может способствовать увеличению производительности труда работников.

Вопросы, которые были рассмотрены, проанализированы и представлены в этой работе, могут служить руководством для проектировщиков. Проектирование осветительной установки должно обеспечить как комфортные зрительные условия в офисе, так и уменьшение энергопотребления, и для этого его следует всячески совершенствовать.

И наконец, все связанные с экологией исследования направлены на то, чтобы оставить грядущим поколениям экологичный мир, в котором они смогут жить, в котором достаточно ресурсов и отсутствует световое загрязнение. И это в значительной мере относится к освещению. Во всех исследованиях, которые проводятся в настоящее время или будут проводиться в будущем, следует учитывать вопросы экологичности. Во всём мире, включая и Турцию, архитектура интерьеров и другие области знаний, связанные с проектированием зданий, должны считать экологию приоритетным направлением, учитывать критерии экологичности освещения и использовать при этом современные методы исследований. Осветительные установки офисов, в которых люди проводят большую часть своего времени, должны обеспечивать комфортные, без какой-либо блёскости, условия на рабочих местах, эффективное естественное освещение и наиболее рациональное расходование энергии.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. ASHRAE/IES Standard 90.1–2007. Energy Standard for Buildings Except Low-Rise Residential Buildings, 2007. USA.
2. *Kılıçaslan, U.G.* Aydınlatma Tasarımı Kriterlerinin Hastane Mekanlarında İrdelenme-

si, Yüksek Lisans Tezi, MSÜ Güzel Sanatlar Fakültesi, İstanbul, 2011.– 159 p.

3. *Gordon, G.* Interior Lighting for Designers. – New Jersey: John Wiley & Sons, Inc. 2003.– 203 p.

4. *Yener, A.K.* Binalarda Günışığından Yararlanma Yöntemleri, Çağdaş Teknikler VIII. Ulusal Tesisat Mühendisliği Kongresi 231 Sempozyum Bildirimi, 2008.– 11 p.

5. *Pohl, W., Zimmermann, A.* SynthLight Handbook Artificial Lighting. – Munich, 2003. –66 pp.

6. <http://www.morganlovell.co.uk/knowledge/whitepapers/sustainable-office-design-unlocking-performance-and-productivity>

7. *İtcalı, E., Somalı, B.* LEED ve BREEAM Uluslararası Yeşil Bina Değerlendirme Sistemlerinin Değerlendirilmesi. // IX. Ulusal Tesisat Mühendisliği Kongresi, İzmir, 2009. – P. 1081–1082.

8. http://www.betterbricks.com/graphics/assets/documents/RatingSystem_Final.pdf.

9. *Uyan, F.* Binalarda Aydınlatma Sistemlerinin Sürdürülebilirliklerini değerlendirme ilkeri, İstanbul, 2010.

10. LEED. Version 4 Reference Guide for Building Design and Construction, 2013.

11. Philips. Lighting for LEED Application Guide for Sustainable Offices. – New York, 2012.– 19 pp.

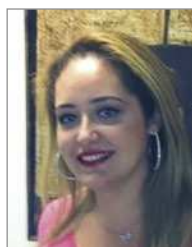
12. <http://www.maxpierson.me/2013/08/01/leed-v4-for-the-lighting-designer/>.

13. *Bakır, I.* The Evaluation Of The Office Buildings According To Leed Certificate Lighting Criteria // Yaşar University Graduate School Of Natural And Applied Sciences Interior Architecture Master Thesis. İzmir, 2015.



İdil Bakır Кючүккая (İdil Bakır Kılıçkaya),

M. Sc. Аспирантка Измирского экономического университета (Ph.D.). Область научных интересов: проектирование



Ебру Алакавук (Ebru Alakavuk),

Ph.D. Место работы – Университет Яшар, Измир, Турция. Область научных интересов: экологичные здания, современные фасады и строительные конструкции

Фотоны научились сталкивать друг с другом

Физики из Чикагского университета придумали новый, очень гибкий, способ заставить фотоны вести себя как частицы материи. Статья об исследовании опубликована 03.07.2019 в журнале «Nature Letters».



Фотоны обладают множеством интересных свойств, включая то, что они не склонны сталкиваться друг с другом. Однако физики всё же попытались сделать это. И у них получилось.

Хитрость в том, чтобы фотоны встретились на границах атома и объединили свои свойства со свойствами электронов. Исследователи изучают эти взаимодействия в лаборатории уже несколько лет. Электрон-фотонные «партнёрства» образуют своего рода гибридную квазичастицу, называемую поляритоном.

Обладание свойствами световой волны позволяет этим квазичастицам быстро перемещаться в пространстве, в то время как атомы, из электронов которых они появились, определяют тип взаимодействия этих частиц между собой. Маломассивные фотоподобные частицы обладают огромным потенциалом в вычислениях и зашифрованной связи, поэтому физики стремятся лучше контролировать их.

«Мы столкнулись с проблемой, потому что фотоны взаимодействуют только с атомами, чьи электронные орбитали имеют очень специфические энергии», – рассказал один из авторов исследования, сотрудник Чикагского университета Логан Кларк.

Поэтому в новом исследовании учёные разбили атомные орбитали на копии с помощью лазера. Они использовали атомы рубидия и смогли изменить их энергетический спектр и расположение орбиталей. Затем физикам удалось столкнуть фотоны с этими орбитальными-копиями, в результате чего получились стабильные поляритоны. В отличие от других таких квазичастиц, поляритоны, полученные по этой методике, можно лучше контролировать, изменяя характеристики излучения лазера.

indicator.ru/
05.07.2019

25 ярких лет: от «Интерсвета» к Interlight Russia | Intelligent Building Russia

Международная выставка освещения, систем безопасности, автоматизации зданий и электротехники в этом году празднует 25-летний юбилей и встречает эту дату существенными обновлениями.

Во-первых, проект эволюционировал и получил новое имя – **Interlight Russia | Intelligent building Russia**. Это название подчёркивает важность каждой части выставки – освещения и строительства.

Во-вторых, поменялись даты: выставка будет проходить раньше, чем в прошлых годах, – **10-13 сентября 2019 года**. Это предоставляет экспонентам больше возможностей для детальной проработки заключённых договорённостей в рамках выставочного проекта.

Девиз Interlight Russia | Intelligent building Russia 2019 – **«25 ярких лет»**, на протяжении которых проект завоевал доверие представителей профессионального сообщества.

В рамках раздела Interlight Russia пройдёт несколько крупных мероприятий:

В 13-й раз пройдёт **Международный LED-форум** – крупнейшая в России и СНГ международная бизнес-конференция о возможностях светодиодных технологий.

Откроет свои двери **Interlight Design Academy** – образовательная площадка для архитекторов и дизайнеров, где на протяжении всех 4-х дней работы выставки будут проходить лекции, семинары и мастер-классы, на которых обсудят тенденции в сфере дизайна, проектирования и интеграции новейших технологий в проекты. Главным по свету будет Константин Цепелев, основатель Bright Buro.

На выставке будут подведены результаты ежегодного конкурса **«Российский светодизайн»**, который нацелен на выявление талантливых светодизайнеров: заявки на участие принимаются до 30 августа включительно. Конкурс проводится при инфоподдержке ARTPLAY, Переделка.TV, журнала «Современный ДОМ» и др.

В 2018 году с успехом дебютировала экспозиция под открытым небом **«Свет в городе»**: в 2019 – она также будет представлена на выставке.

Нововведение этого года – «Новогодняя экспозиция», посвящённая украшению общественных пространств в зимний праздничный период. Производители не только покажут свою продукцию, но и расскажут о секретах и особенностях зимнего украшения улиц.

В рамках раздела Intelligent Building Russia пройдёт **Intersec Forum Russia-2019**, посвящённый автоматизации зданий и интегрированным системам безопасности. Форум состоится при официальной поддержке лидеров отрасли.

На протяжении всех четырёх дней работы выставки будет работать масштабная образовательная площадка **«Электро-техническая Академия»**. Дарья Макурова выступит в качестве гида по миру автоматизации зданий. Программа составлена для широкого круга специалистов: технических специалистов, главных инженеров, инженеров-электриков, инженеров-инсталляторов, проектировщиков, прорабов, сборщиков щитового оборудования, представителей оптовой и розничной торговли, дизайнеров.

В этом году своё участие в выставке подтвердили уже более 170 компаний из Армении, Беларуси, Венгрии, Германии, Испании, Италии, Кореи, Польши, Португалии, РФ, Таиланда, Турции, Финляндии, Франции, Чехии, Японии, а также Китая и Гонконга.

Официальные материалы:

<https://interlight-moscow.ru.messefrankfurt.com/moscow/ru/press.html>

Мы в социальных сетях:

<https://www.facebook.com/InterlightMoscow/>

https://vk.com/interlight_moscow

https://www.instagram.com/interlight_moscow/

<https://www.youtube.com/channel/>

UC5tttd62ylzqyV03M8stQBCg

Информация о концерне Messe Франкфурт ГмБХ

Messe Франкфурт – крупнейший в мире организатор выставок, конгрессов и мероприятий с собственным выставочным центром. Со штатом более 2500* сотрудников в 30 офисах по всему миру, годовой оборот компании составляет более €715* миллионов. Благодаря обширному опыту в наиболее значимых секторах, а также работе sales-партнёров, компания эффективно работает в интересах своих клиентов.

Значительный спектр услуг концерна – во время подготовки и на площадке – гарантирует потребителям высокое качество и широкие возможности в рамках планирования, организации и проведения их мероприятий по всему миру. Услуги включают в себя аренду выставочной площади, застройку и маркетинговую поддержку участников, аренда персонала и кейтеринг. Главный офис компании находится во Франкфурте-на-Майне, 60 % акций принадлежат городу Франкфурт-на-Майне, 40 % – земле Гессен.

Для получения дополнительной информации пройдите по ссылке: www.messefrankfurt.com

* информация актуальна на 2018 г.

Обзор методов снижения размерности при обработке гиперспектральных оптических сигналов¹

А. ДЕЛЬ АГИЛА, Д.С. ЕФРЕМЕНКО¹, Т. ТРАУТМАНН

Институт методологии дистанционного зондирования Германского аэрокосмического центра (DLR), Оберфаффенхофен, Германия
E-mail: dmitry.efremenko@dlr.de

Аннотация

Гиперспектральные датчики проводят измерения в узких сопряжённых полосах спектра электромагнитного излучения. Целью при этом обычно является обнаружение определённого объекта или элемента среды, имеющих присущие только им спектральные характеристики. В частности, гиперспектральные измерения применяются при дистанционном зондировании атмосферы для выявления малых газовых компонент. Для улучшения эффективности алгоритма обработки гиперспектральных данных были использованы методы уменьшения количества данных. В статье описаны методы снижения размерности применительно к гиперспектральному дистанционному зондированию атмосферы. При снижении размерности происходит исключение из данных избыточной информации, и в настоящее время снижение размерности является неотъемлемой частью высокопроизводительных моделей переноса излучения. В обзоре описано, как можно использовать метод главных компонент² для моделирования спектрального распределения энергетической яркости и определения составляющих атмосферы, ускоряя тем самым на порядки скорость обработки данных. Представленные методы являются обобщёнными, и их можно непосредственно использовать для решения как атмосферных задач, так и задач из других связанных с материаловедением областей знаний.

Ключевые слова: пассивное дистанционное зондирование, гиперспектральные данные, метод главных компонент, физически полное машин-

ное самообучение, определение малых газовых компонент.

1. Введение

Гиперспектральные датчики регистрируют прошедшее или отражённое излучение в узких сопряжённых полосах спектра электромагнитного излучения. Целью при этом обычно является обнаружение определённого объекта или элемента среды, имеющих присущие только им спектральные характеристики, т.е. свои особенные «отпечатки пальцев». Гиперспектральная визуализация результатов зондирования стала одним из наиболее действенных методов в различных областях, включая астрономию, минералогию, сельское хозяйство, медицину и химию. Например, гиперспектральные данные (которые иногда называют гиперкубическими данными (*hypercube data*) или кубом изображения (*image cube*)), используются в астрономии и при дистанционном зондировании Земли для создания пространственно-разрешённого спектрального изображения, обеспечивающего возможность более точного отождествления и классификации объектов в поле зрения прибора. В то же время, для обработки гиперспектральной информации и получения определённой характеристики рассеивающей среды требуются существенные объёмы памяти и вычислительные возможности.

В этом обзоре мы сконцентрировали внимание на гиперспектральном дистанционном зондировании атмосферы. Пассивные датчики состава атмосферы регистрируют и записывают энергетическую яркость отражённого атмосферой Земли излучения в ультрафиолетовой, видимой и инфракрасной областях спектра. Информацию об атмосфере затем извлекают из этих спектральных данных при помощи так называемых атмосферных процессо-

ров (*atmospheric processors*), то есть алгоритмов, специально предназначенных для преобразования результатов произведённых этими датчиками измерений [1]. Извлечение информации о геофизических характеристиках (данные 2-го уровня) из спектральных распределений энергетической яркости (данные 1-го уровня) представляет собой большую вычислительную проблему и требует использования высокоскоростных компьютеров [2].

Последние достижения в области оптики, конструкции датчиков и методов измерений привели к существенному улучшению характеристик датчиков состава атмосферы, таких как пространственное разрешение и отношение сигнала к шуму. В таблице проведено сравнение приборов предыдущего поколения, таких как оборудование для глобального мониторинга озона (*Global Ozone Monitoring Experiment*) *GOME* и *GOME-2*, и новейшего прибора для мониторинга тропосферы (*TROPOspheric Monitoring Instrument*) *TROPOMI*, установленного на борту спутника *Copernicus Sentinel 5 Precursor (S5P)*. Пространственное разрешение прибора *TROPOMI* на два порядка выше, и он позволяет получить в день 21 млн спектров 1-го уровня, т.е. почти 8 млрд спектральных точек, тогда как отношение сигнала к шуму в ультрафиолетовом и видимом каналах достигает у него значений, примерно равных 1500. На рис. 1 приведён пример полученной с помощью этого прибора карты распределения тропосферного диоксида азота (NO_2). Обратите внимание на то, что на рисунке хорошо видны загрязнения атмосферы, обусловленные большими городами и морскими путями сообщения. Данные высокого разрешения позволяют не только зарегистрировать загрязнение воздуха над отдельными городами, но и определить источник загрязнения и, тем самым, выявить области, наиболее опасные с точки зрения загрязнения атмосферы. Такое имеющее высокую разрешающую способность дистанционное спутниковое зондирование атмосферы очень полезно для определения состава атмосферы в мировом масштабе, в частности, для выявления мелкомасштабных источников загрязнения и увеличения доли наблюдений, осуществляемых при отсутствии облачности. В то же время, высокая разрешающая способ-

¹ Перевод с англ. Е.И. Розовского

² В рассматриваемой области принято использовать имя существительное женского рода «компонента». – Прим. пер.

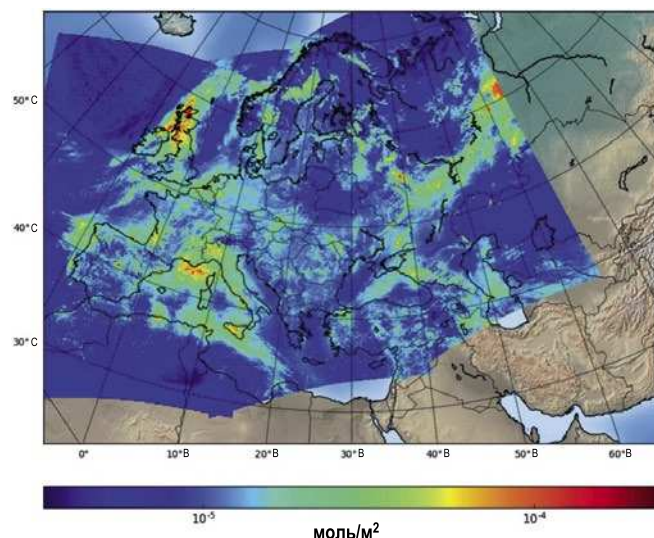
ность современных датчиков состава атмосферы выливается в чрезвычайно большой объём подлежащих обработке данных – 240 Тбайт в год для данных 1-го уровня.

Фактически, объём спутниковых данных возрастает быстрее, чем быстроедействие компьютеров [4]. Так как данные, получаемые при дистанционном зондировании, удовлетворяют 3V-критерию Дуга Лани (*Doug Laney*) (существенный рост в части объёма, скорости и многообразия (*volume, velocity, variety*)), то их относят к большим данным. Чтобы удовлетворить требования к быстройдействию, для атмосферных процессоров следует разработать новые эффективные методы обработки данных.

Модель переноса излучения (МПИ) является ключевым элементом и основным узким местом атмосферных процессоров. Кроме того, гиперспектральная МПИ включает в себя иерархию вложенных циклов вычислений [6], приведённую в виде псевдокода на рис. 2. В опубликованных недавно обзорах (см., например, [7–9]) показано, что существенное увеличение быстройдействия может быть обеспечено, скорее, благодаря оптимизации рамочной программы, в которой осуществляется вызов программы для расчёта переноса излучения (*Radiative transfer solver*), а не за счёт ускорения работы самой МПИ. Фактически, возможность улучшения быстройдействия программ для расчёта переноса излучения представляется маловероятной [10]. Было предпринято несколько попыток оптимизации циклов в части наземных пикселей и геометрии (см., например, [11–14] и приведённые в них ссылки на литературу). В настоящее время наиболее затратной с точки зрения гиперспектральных расчётов является цикл, связанный с длинами волн. Важной частью анализа больших данных является снижение размерности, которое в случае МПИ относится к циклу, связанному с длинами волн. Наиболее известным представителем способов снижения размерности является метод главных компонент (*principal component analysis – PCA*), который был предложен в 1901 г. К. Пирсоном [15] и в настоящее время является неотъемлемой частью гиперспектральных МПИ.

Были предприняты многочисленные попытки разработать гиперспектральные МПИ, в которых в полной

Рис. 1. Пример результатов измерений тропосферного диоксида азота (NO_2), выполненных 01.04.2019 при помощи прибора *Sentinel-5P* (данные находятся в свободном доступе на <https://s5phub.copernicus.eu/dhus>)



```

для каждого наземного пикселя
  для каждой длины волны: #<-- цикл гиперспектральной обработки
    для каждой геометрии:
      вызов программы для решения задачи переноса излучения (Radiative transfer solver);
  
```

Рис. 2. Иерархия циклов вычислений, приводящих к вызову программы для решения задачи переноса излучения (*Radiative transfer solver*)

мере учитывались бы взаимозависимость и статистические соотношения между данными 1-го и 2-го уровня [16]. Целью этого обзора является систематизированное описание основных концепций снижения размерности применительно к созданию атмосферных процессоров и сведения воедино последних достижений в этой области.

2. Снижение размерности

2.1. Наследство метода k -распределения

В науке об атмосфере и астрофизике методам снижения размерности предшествовали методы, которые хотя и не в полной мере использовали *PCA*, но всё же были основаны на сильной взаимозависимости гиперспектральных данных. В [17] отмечалось, что перенос излучения в спектральном интервале связан не с *line-by-line (LBL)* зависимостью коэффициента поглощения k от длины волны λ , а, скорее, с распределением коэффициента поглощения в пределах этого спектрального интервала. Этот подход называют методом k -распределения. Он основан на кумулятивном распределении частоты k , а именно, на $G(k)$, и обрат-

ная функция распределения $k(G)$ как раз и является k -распределением. Так как $G(k)$ представляет собой гладкую функцию, а $k(\lambda)$ сильно зависит от длины волны, то с точки зрения эффективности расчётов полезно заменить интегрирование в пространстве λ на интегрирование в пространстве G (в этом случае для численного интегрирования потребуется меньшее количество точек). В [18] этот метод был распространён на неоднородную атмосферу в приближении наличия корреляции между k -распределениями при различных уровнях давления – это метод коррелированных k -распределений. В других методах, таких, как подбор суммы экспоненциальных функций (*exponential sum fitting*) [19], спектральное отображение (*spectral mapping*) [20], основанный на k -бинировании подход (*k-binning approach*) [21], метод выборки прозрачности (*opacity sampling method*) [22], метод многомерных k -распределений (*multi-dimensional k-distribution method*) [23] и быстрые модели k -распределений (*fast k-distribution models*) [24, 25], используются аналогичные, хотя и основанные на более сложной математике, подходы. В [26] была рассмотрена модификация метода k -распределений, в которой интегрирование про-

водилось в исходном пространстве λ . В [27] был предложен основанный на однородных спектральных сетках эмпирический метод выбора наиболее характерных спектральных точек при проведении *LBL* расчётов. В совокупности, эти связанные с *k*-распределением исследования говорят о том, что гиперспектральную энергетическую яркость можно рассчитывать с использованием гораздо меньшего количества монохроматических расчётов, чем требуется в рамках *LBL* программы, и тем самым эти работы формируют основу для снижения размерности рассматриваемой задачи.

2.2. Базовая концепция снижения размерности

Простому говоря, снижение размерности – это представление исходного набора данных при помощи меньшего, чем вначале, количества параметров. Его можно считать одним из примеров сжатия данных с потерями [28]. Снижение размерности имеет решающее значение для стабильной и высокопроизводительной обработки результатов спектральных измерений. Оно обеспечивает исключение несущественной информации из исходного набора данных, уменьшение количества независимых параметров и улучшение эффективности машинного самообучения.

Существует разница между линейными и нелинейными методами снижения размерности. Более подробный обзор можно найти в [29–30] и в приведённых в данной статье ссылках на литературу. Сравнение линейных и нелинейных методов было проведено в [33]. Результаты этих численных экспериментов говорят о том, что нелинейные методы хорошо работают в отдельных искусственно сформированных случаях. Однако при решении реальных задач они вряд ли превосходят *PCA*. К аналогичным выводам пришли в [34], где несколько методов снижения размерности сравнивались применительно к ускорению рассмотрения переноса излучения. Принимая во внимание тот факт, что в результате сравнительного анализа не был выявлен ни один метод, который можно было бы считать наилучшим (более сложные и требующие больших временных затрат методы снижения размерности приводят к получению более точных результатов, и наоборот),

наш анализ будет ограничен классическим *PCA*.

2.3. Метод главных компонент

Несмотря на то, что методы снижения размерности хорошо известны и входят во многие статистические библиотеки (например, библиотека *scikit-learn* [35] для языка программирования *Python*), мы приведём короткий математический анализ, который позволит лучше понять вышеизложенное. Для простоты обозначим размер матрицы как $\in \mathbb{R}^{\text{строки} \times \text{столбцы}}$, вектор-строку энергетической яркости атмосферы для *W* длин волн $\{\lambda_w\}_{w=1, \dots, W}$ – как

$$\mathbf{y} = (y(\lambda_1), y(\lambda_2), \dots, y(\lambda_W)), \quad \mathbf{y} \in \mathbb{R}^{1 \times W}.$$

Тогда совокупность *S* спектров образует матрицу $\mathbf{Y} \in \mathbb{R}^{S \times W}$ с *i*-ой строкой \mathbf{y}_i , а \mathbf{y}_i можно записать в новой системе координат, как:

$$\mathbf{y}_i = \bar{\mathbf{y}} + \sum_{k=1}^W t_{ik} \mathbf{f}_k,$$

где $\bar{\mathbf{y}} = \sum_{i=1}^S \mathbf{y}_i / S$, $\bar{\mathbf{y}} \in \mathbb{R}^{1 \times W}$ – выборочное среднее для спектра (усреднённый спектр), t_{ik} – *k*-я координата вектора \mathbf{y}_i в новой системе координат, а

$$\mathbf{f}_k = (f_k(\lambda_1), f_k(\lambda_2), \dots, f_k(\lambda_W)) \in \mathbb{R}^{1 \times W}$$

– *k*-ый базисный вектор новой системы координат. Учитывая то обстоятельство, что высокоразмерные реальные данные обычно образуют линейное многообразие меньшей размерности, то спектр \mathbf{y}_i может быть спроецирован на имеющее размерность *K* подпространство ($K < W$) следующим образом:

$$\mathbf{y}_i \approx \bar{\mathbf{y}} + \sum_{k=1}^K t_{ik} \mathbf{f}_k, \quad (1)$$

или в соответствующем исходному набору данных матричном виде:

$$\mathbf{Y} \approx \bar{\mathbf{Y}} + \mathbf{T}\mathbf{F},$$

где $\bar{\mathbf{Y}} = \{\bar{\mathbf{y}}_1, \dots, \bar{\mathbf{y}}_S\} \in \mathbb{R}^{S \times W}$,

$$\mathbf{F} = \{\mathbf{f}_1, \mathbf{f}_2, \dots, \mathbf{f}_K\}^T \in \mathbb{R}^{K \times W},$$

$\mathbf{T} \in \mathbb{R}^{S \times K}$ – матрица с элементами

$$\{t_{ik}\}_{i=1, \dots, S}^{k=1, \dots, K}. \text{ Здесь и далее верхний индекс } T \text{ означает «транспонированная»}.$$

Преобразование (1) можно произвести методами снижения размерности, такими, как *PCA* [15]. В последнем случае, входящие в (1) базисные векторы \mathbf{f}_k называют «главными компонентами» (ГК) или эмпирическими ортогональными функциями (ЭОФ) и используют их в качестве *K* собственных векторов, соответствующих наиболее важным собственным значениям ковариационной матрицы $\text{cov}(\mathbf{Y}, \mathbf{Y}) \in \mathbb{R}^{W \times W}$. Координаты t_{ik} в новой системе координат и соответствующую матрицу \mathbf{T} называют «координатами главных компонент» (*principal component scores*).

3. Основанная на главных компонентах модель переноса излучения для гиперспектральных сигналов

В самом простом по своей сути подходе используется тренировочный набор спектров, позволяющий при помощи *PCA* сформировать набор ЭОФ, а затем при помощи *K* монохроматических энергетических яркостей восстановить гиперспектральный сигнал в *W* спектральных точках. Естественно, $K < W$.

Теория *PCA*, кратко изложенная в предыдущем разделе, говорит о линейной зависимости между координатами ГК и монохроматическими энергетическими яркостями:

$$\mathbf{y}(\lambda) = \bar{\mathbf{y}}(\lambda) + t_1 \mathbf{f}_1(\lambda) + \dots + t_K \mathbf{f}_K(\lambda). \quad (2)$$

Так что для заданного набора из *K* ЭОФ и *K* спектральных точек можно получить замкнутую систему из *K* линейных уравнений:

$$\begin{cases} \mathbf{y}(\lambda_1) = \bar{\mathbf{y}}(\lambda_1) + t_1 \mathbf{f}_1(\lambda_1) + \dots + t_K \mathbf{f}_K(\lambda_1), \\ \mathbf{y}(\lambda_2) = \bar{\mathbf{y}}(\lambda_2) + t_1 \mathbf{f}_1(\lambda_2) + \dots + t_K \mathbf{f}_K(\lambda_2), \\ \dots \\ \mathbf{y}(\lambda_K) = \bar{\mathbf{y}}(\lambda_K) + t_1 \mathbf{f}_1(\lambda_K) + \dots + t_K \mathbf{f}_K(\lambda_K). \end{cases} \quad (3)$$

Важно, что значения энергетической яркости в *K* спектральных точках представлены теми же ЭОФ. Решив (3), мы получаем координаты ГК t_1, \dots, t_K , а при помощи уравнения (2) можно с лёгкостью восстановить полный спектр в *W* спектральных точках.

Этот подход требует наличия заранее рассчитанных ЭОФ, которые могут быть получены при помощи тренировочного набора смоделированных или измеренных спектров. На рис. 3

приведён пример работы *PCA*, применённого к набору спектров, рассчитанному для полосы Хартли-Хаггинса, используемой при определении количества озона. Этот набор данных состоит из 10^5 спектров. При формировании спектра отражения изменяли следующие параметры: зенитный угол солнца, зенитный угол наблюдения, относительный азимутальный угол, альbedo поверхности, приведённую толщину слоя озона, высоту расположения поверхности и температуру. В правой части рис. 3 видно, что почти 99,9 % изменений данных можно объяснить влиянием только 5-ти ГК.

Чтобы добиться максимальной эффективности, параметры этой схемы, такие, как K и набор выбранных длин волн, следует подобрать опытным путём. Число K зависит от желательного уровня изменений, который должен быть замечен ГК. Для определения оптимального количества ГК было предложено несколько полумпирических правил (например, модель сломанной трости [36]). Однако нет никакого универсального правила выбора K – этот выбор зависит от области применения. Если же говорить о выборе длин волн, то в [37] был предложен основанный на использовании корреляционной функции метод выбора длин волн монохроматического излучения. Этот метод включает в себя следующие этапы:

1. Расчёт коэффициентов корреляции для значений энергетической яркости и последующее преобразование их в векторные углы при помощи функции «арккосинус».

2. Перестановка спектральных данных в соответствии с величиной коэффициента корреляции.

3. Отбор монохроматических энергетических яркостей, основанный на выборе предикторов с равным расстоянием между значениями коэффициентов корреляции.

Схема основанной на *PCA* модели гиперспектрального переноса излучения приведена на рис. 4. Входные данные, включающие в себя оптические параметры атмосферы, соответствующие набору длин волн, передаются в программу для расчёта переноса монохроматического излучения. Для получения наиболее репрезентативного набора данных рекомендуется использовать метод умной выборки [38], основанный на последовательностях Халтона [39]. В результате фор-

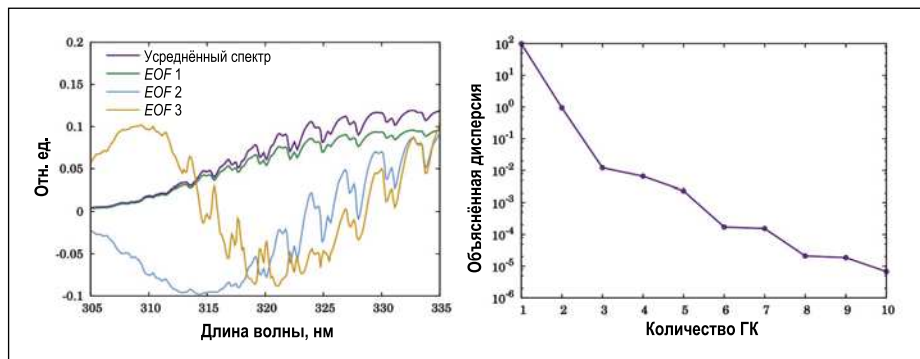


Рис. 3. Усреднённый спектр и три первые ЭОФ, рассчитанные в полосе Хаггинса (слева), и зависимость объяснённой дисперсии от количества ГК (справа)

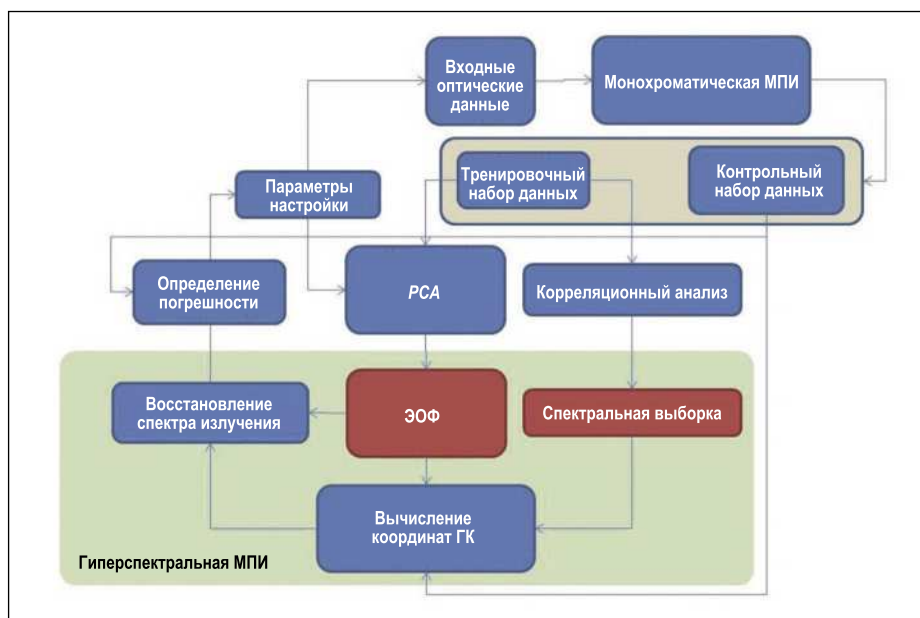


Рис. 4. Схема основанной на *PCA* модели переноса излучения с использованием предварительно рассчитанных ЭОФ – стадия «офлайн»

Рис. 5. То же, что и на рис. 4, но на стадии «онлайн»



мируется набор спектров, который делится на тренировочный и контрольный наборы данных. Применение к тренировочному набору данных *PCA* и корреляционного анализа позволяет, соответственно, получить систему ЭОФ и выбрать подмножество спектральных точек (спектральная выборка). Эти два результата сохраняются и используются для определения координат ГК для контрольного набора данных. Спектры во всём интервале длин волн восстанавливают при помощи уравнения (2), после чего можно определить погрешность этого восстановления. Если погрешность превышает допустимую, то увеличивают количество сгенерированных спектров и ГК. Основным результатом тре-

нировочной стадии является полученные ЭОФ и спектральной выборки (на рис. 4 эти результаты выделены красным фоном), которые позволяют обрабатывать новые данные в режиме онлайн (см. рис. 5).

В [37] отмечалась линейность оператора свёртки аппаратной функции и *PCA*. Поэтому и координаты ГК свёрнутых спектров являются линейными функциями монохроматических энергетических яркостей. Так что на тренировочной стадии соответствующие весовые коэффициенты линейной зависимости сохраняют совместно с системой ЭОФ и спектральной выборкой. Авторы [37] утверждают, что для ИК области, охватывающей промежуток между 650 и 3500 см^{-1} ,

использование свёрнутых спектров приводит к уменьшению количества монохроматических вычислений с нескольких тысяч до нескольких сот.

Описанный подход оказался эффективным и был использован в нескольких пакетах программ (например, в *PCTRM* [37], *RTTOV* [40] и других [41, 42]). Основным недостатком этого подхода является то, что он требует проведения длительных вычислений для тренировочного набора данных.

4. Метод главных компонент в случае дифференциальной спектроскопии оптического поглощения

В этом разделе мы рассмотрим использование *PCA* применительно к дифференциальной спектроскопии оптического поглощения (ДСОП) [43]. ДСОП широко используется для выявления малых газовых концентраций. Основными достоинствами этого метода являются его простота и устойчивость, обусловленные его способностью отфильтровывать влияние тех факторов, которые не рассматриваются должным образом в рамках *PCA*. Основная идея ДСОП состоит в том, что обусловленное газами поглощение приводит к появлению характерных особенностей в спектре энергетической яркости, тогда как влияние многократного рассеяния и иных факторов в пространстве длин волн обычно оказывается плавным. Согласно [44], энергетическую яркость излучения, отражённого атмосферой, состоящей из N_g газообразных веществ с коэффициентами поглощения $\sigma_{abs, g}$, можно в соответствии с законом слабого поглощения Бугера-Ламберта-Бера представить в виде:

$$\ln y(\lambda) = -\sum_{g=1}^{N_g} S_g \sigma_{abs, g}(\lambda) - P(\lambda) - RRS(\lambda), \quad (4)$$

где S_g – численная плотность газа g вдоль оптической траектории (которую называют ещё и плотностью наклонного столба (*slant column density*)), $P(\lambda)$ – полином, учитывающий влияние как рэлеевского рассеяния и рассеяния на аэрозолях и в облаках, так и отражения от поверхности, а RRS учитывает вращательное комбинационное рассеяние [45, 46].

В обычных ДСОП S_g определяют посредством минимизации методом наименьших квадратов невязки между измеренным (левая часть уравнения (4)) и смоделированным (правая часть уравнения (4)) спектрами энергетической яркости. Затем S_g преобразуют в плотность вертикального столба Ω_g с использованием приведённой толщины воздуха (*air mass factor*). Последнюю вычисляют для одной длины волны в предположении заданного вертикального распределения газа g [47, 48].

В [49] была предложена модификация метода ДСОП применительно к определению приведённой толщины слоя SO_2 , когда *PCA* применяют к спектрам, измеренным в районах с несущественным наличием SO_2 , например, в экваториальной зоне Тихого океана:

$$\ln y(\lambda) = \overline{\ln y}(\lambda) + \sum_{i=1}^K t_i \mathbf{f}_k(\lambda). \quad (5)$$

При этом ЭОФ охватывают всё многообразие данных, обусловленное протеканием физических процессов (например, рэлеевским рассеянием, вращательным комбинационным рассеянием и поглощением озоном). Кроме того, ЭОФ полностью учитывают особенности прибора (например, ухудшение его характеристик, аппаратную функцию и измерительные устройства). Это тренировочная стадия. Что касается районов, загрязнённых SO_2 , то в их случае уравнение (5) приведёт к невязке при определении содержания SO_2 . Так что для этих районов

$$\ln y(\lambda) = \overline{\ln y}(\lambda) + \sum_{i=1}^K t_i \mathbf{f}_k(\lambda) + \Omega_{SO_2} \frac{\partial \ln y(\lambda)}{\partial \Omega_{SO_2}}. \quad (6)$$

где Ω_{SO_2} – плотность вертикального столба SO_2 . Производную, которая входит в последний член этого уравнения, можно определить или методом конечных разностей, или при помощи линейаризованных моделей переноса излучения [50, 51]. Уравнение (6) позволяет с лёгкостью определить Ω_{SO_2} .

Этот метод был использован применительно к данным, полученным при помощи прибора для мониторинга озона (*Ozone Monitoring Instrument*) [52] в диапазоне длин волн 310–340 нм. Так как ГК высоких поряд-

ков отражают скорее шум, чем полезный сигнал, то усечение ГК выступает и в качестве фильтра. Для восстановления спектральных энергетических яркостей требовались, по меньшей мере, 20–30 ГК, тогда как при наличии обусловленных SO_2 относительно сильных сигналов это количество можно было уменьшить до 8. Авторы [52] утверждают, что шум в данных был уменьшен вдвое, тем самым обеспечив большую чувствительность к антропогенным источникам SO_2 .

На настоящий момент нет сообщений об аналогичном подходе к регистрации других малых газовых компонент. Одна из причин этого связана со сложностью получения системы ЭОФ для участков, в которых те или иные малые газовые компоненты отсутствуют. Вторая причина заключается в том, что, строго говоря, описание (6) является приблизительным. Для SO_2 эта формула работает нормально, и невязка непосредственно связана с обусловленным SO_2 сигналом. Для других малых газовых компонент уравнение (6) может оказаться несправедливым, и для них нужен более сложный подход.

5. Снижение размерности в МПИ с машинным самообучением

5.1. Общие соображения

Как и в [53], обратная задача решается посредством сведения её к задаче оптимизации. Основная идея этого метода заключается в поиске вектора состояния, обеспечивающего минимизацию невязки между результатами моделирования и измерений. Нелинейную обратную задачу решают методом последовательных приближений [54, 55]. Задав априорный вектор состояния \mathbf{x} , линейризуем около него нелинейную прямую модель. Затем можно с лёгкостью обратить эту линейризованную модель и сформировать новый вектор состояния. Этот итерационный подход широко используется как для выявления малых газовых концентраций, так и для определения характеристик аэрозолей и облаков [56]. Однако этот метод обращения требует очень больших временных затрат из-за повторяющегося обращения к моделирующим энергетическую яркость сложным прямыми моделям переноса излучения и матри-

цам Якоби (то есть к матрицам частных производных первого порядка спектральной энергетической яркости по x) и последующего обращения сравнительно больших матриц. Эти соображения служат побудительной причиной для разработки альтернативных методов обращения для осуществляемого в реальном времени дистанционного зондирования, в основу которых были бы положены методы машинного самообучения и которые иногда называют физически полными инверсивными самообучающимися машинами (*full-physics inverse learning machines – FP-ILM*) [57].

5.2. Концепция самообучающихся машин для исследований атмосферы

Алгоритмы машинного самообучения охватывают задачу оптимизации не полностью. Скорее, они обеспечивают *получение знания* от заданной совокупности данных и делают прогнозы относительно нужных параметров. В принципе, алгоритм машинного самообучения состоит из тренировочной стадии, в рамках которой на основе данных, смоделированных при помощи МПИ (которая генерирует «физический полный» набор компонент), получают оператор обращения, и операционной стадии, в рамках которой этот оператор применяют к результатам реальных измерений. Основным преимуществом этого подхода перед традиционным состоит в том, что моделирование осуществляется в режиме офлайн, а сам оператор обращения оказывается устойчивым и простым с вычислительной точки зрения.

На рис. 6 представлена схема возможной реализации самообучающейся машины. На тренировочной стадии при помощи физически полной прямой модели, которой в рассматриваемом случае является МПИ, производится расчёт тренировочного набора данных. Для выявления важных элементов смоделированного набора данных и во избежание «избыточной размерности» (так называемого эффекта Хьюза [58]) смоделированные спектральные данные сжимают при помощи подходящего метода снижения размерности. Преобразование смоделированных спектров уменьшенной размерности в нужный параметр осуществляется при помощи машинного самообучения.

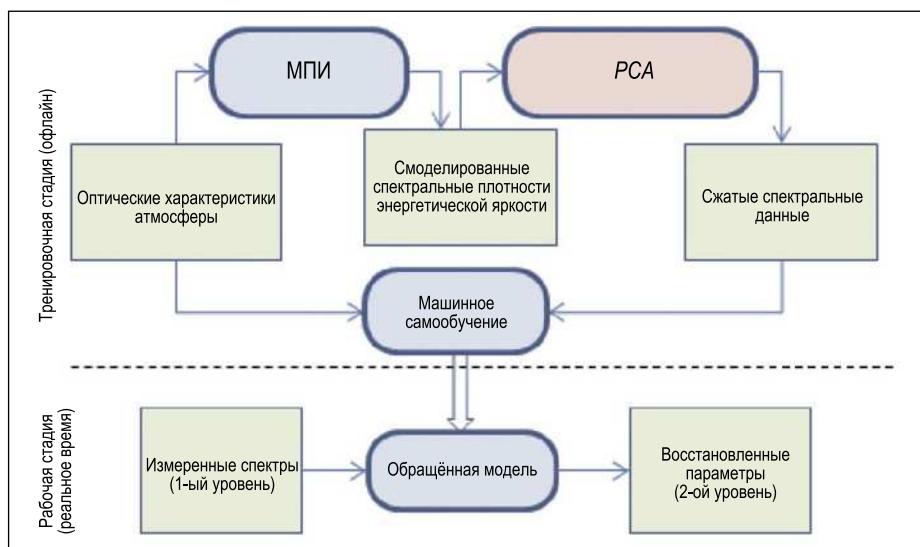


Рис. 6. Схема алгоритма поиска в рамках машинного самообучения, в котором используется снижение размерности спектрального распределения энергетической яркости

5.3. Машинное самообучение, основанное на линейной регрессии

В алгоритмах поиска, основанных на линейной регрессии, используется следующее представление искомого параметра x :

$$x = c + \sum_{w=1}^W l_w y(\lambda_w),$$

где c – линейное смещение, а l_w – коэффициенты регрессии. Метод регрессии главных компонент (РГК) основан на модели линейной регрессии, которая связывает x и координаты ГК спектральной энергетической яркости:

$$x = c + \sum_{k=1}^K l_k t_k;$$

Так как $K \ll W$, то размерность модели линейной регрессии (и соответствующей обратной задачи) уменьшается. Более того, так как аппаратные шумы не влияют на координаты ГК низких порядков, то вся схема обращения оказывается более стабильной.

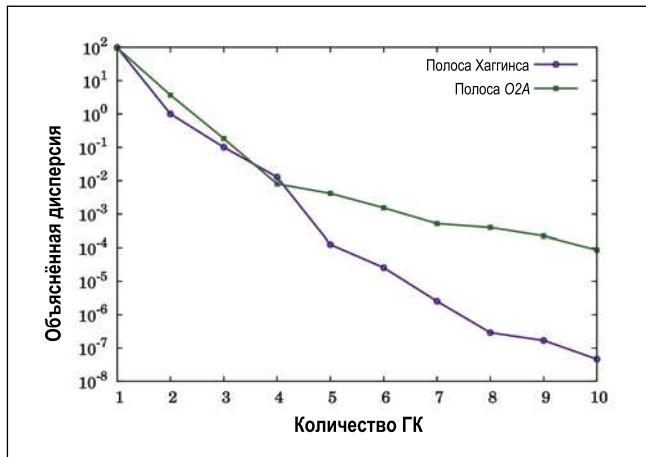
Для данных с большим уровнем шума собственные векторы F следует рассчитать для матрицы $C_Y + C_\epsilon$, где C_ϵ – ковариационная матрица для шума, а не для матрицы C_Y . В этом случае, координаты ГК для данных с большим уровнем шума коррелированы, и поэтому их называют «спроецированными ГК» (*projected principal components*) [59]. Если статистические характеристики шума неизвестны, то ковариационную матрицу можно получить, сделав ряд допущений (например, гауссовский шум) или воспользо-

вавшись аппроксимацией $C_\epsilon \approx \alpha I$, где I – единичная матрица, а α – параметр регуляризации. Эта процедура уменьшает влияние ГК высоких порядков.

Обобщением метода РГК является ядерная гребневая регрессия (ЯГР) (*kernel ridge regression*), которая используется для прогнозирования атмосферных профилей на основе данных, полученных при помощи инфракрасного интерферометра для зондирования атмосферы (*LAS*) [61]. Недостатком основанных на РГК и ЯГР моделей является то, что для представления результатов измерений используются базисные векторы F , тогда как содержащаяся в X информация во внимание не принимается. Альтернативной моделью, в которой этот недостаток обходится, является регрессия частных наименьших квадратов [62]. В [63, 64] было показано, что регрессия частных наименьших квадратов позволяет подобрать модель с использованием меньшего, чем в случае РГК, количеством ГК. В свою очередь, регрессию частных наименьших квадратов можно обобщить на случай, когда требуется получить не одну переменную x , а набор коррелированных параметров (например, температурный профиль). Соответствующий метод называют методом канонических корреляций [65]. Использование канонической корреляции в науке об атмосфере рассмотрено в [66].

Основанный на РГК подход был успешно применён к решению задач определения высот выброса пе-

Рис. 7. Зависимость объяснённой дисперсии от количества ГК в полосе Хаггинса и полосе O2A



пла вулканами на основе результатов измерений, сделанных приборами GOME-2 [67] и TROPOMI [68], а также спутником GOSAT [69, 70].

6. Снижение размерности входных оптических данных

6.1. Моделирование спектров

В [71] был предложен эффективный метод, основанный на снижении размерности входных оптических данных. В этом методе используется конечно-разностная локальная линейризация МПИ применительно к входным параметрам. Для уменьшения обращений МПИ к расчёту конечных разностей, линейризация осуществляется в уменьшенном пространстве данных. Этот метод можно кратко описать следующим образом.

Сначала вводится поправочная функция

$$Q(\lambda_w) = \ln[y(\lambda_w) / y_a(\lambda_w)]. \quad (7)$$

где y – энергетическая яркость, рассчитанная при помощи полной МПИ, а y_a – энергетическая яркость, рассчитанная при помощи приближённой модели (например, двухпоточной модели (*two-stream model*)). Затем для атмосферы, состоящей из L слоёв, вводится вектор состояния $\mathbf{x}_w \in \mathbb{R}^{2L+1}$, содержащий оптические параметры всех слоёв, например,

$$\mathbf{x}_w^T = \left[\begin{array}{c} \sigma_{\text{abs},1}(\lambda_w), \dots, \sigma_{\text{abs},L}(\lambda_w), \\ \sigma_{\text{sct},1}(\lambda_w), \dots, \sigma_{\text{sct},L}(\lambda_w), \rho(\lambda_w) \end{array} \right],$$

где $\sigma_{\text{sct},i}$ и $\sigma_{\text{abs},i}$ – соответственно, коэффициенты рассеяния и поглощения для i -го слоя, а ρ – альбедо поверхности. В результате, всё обусловленное зависимостями от длины волны мно-

гообразии оптических параметров, представляющих собой входные данные программы для расчёта переноса излучения, оказывается заключённым в векторе \mathbf{x}_w . Обратите внимание на то, что фазовая функция считается постоянной в пределах заданного спектрального интервала, вследствие чего она не вошла в вектор \mathbf{x}_w . Применив PCA к $\{\mathbf{x}_w\}_{w=1}^W$, получаем:

$$\mathbf{x}_w \approx \bar{\mathbf{x}} + \sum_{k=1}^K t_{wk} \mathbf{f}_k, \quad \bar{\mathbf{x}} = (1/W) \sum_{w=1}^W \mathbf{x}_w.$$

На рис. 7 приведены результаты PCA, осуществлённого применительно к входным оптическим данным, относящимся к полосе Хаггинса (315–335 нм) и полосе O2A (755–775 нм). Оптические данные были взяты из [72]. Обратите внимание на то, что для описания 99,9 % изменчивости набора данных достаточно четырёх ГК.

Теперь предположим, что $Q(\mathbf{x}_w)$ можно достаточно хорошо аппроксимировать рядом Тейлора относительно $\bar{\mathbf{x}}$:

$$Q(\mathbf{x}_w) \approx Q(\bar{\mathbf{x}} + \Delta \mathbf{x}_w) \approx Q(\bar{\mathbf{x}}) + \Delta \mathbf{x}_w^T \nabla Q(\bar{\mathbf{x}}) + \frac{1}{2} \Delta \mathbf{x}_w^T \nabla^2 Q(\bar{\mathbf{x}}) \Delta \mathbf{x}_w, \quad (8)$$

где ∇Q и $\nabla^2 Q$ – градиент и гессиан Q соответственно. Воспользовавшись центральными разностями для аппроксимации входящих в (8) производных по направлению первого и второго порядков, получаем:

$$Q(\mathbf{x}_w) \approx Q(\bar{\mathbf{x}}) + \frac{1}{2} \sum_{k=1}^K \left[Q(\bar{\mathbf{x}} + \mathbf{f}_k) - Q(\bar{\mathbf{x}} - \mathbf{f}_k) \right] t_{wk} + \frac{1}{2} \sum_{k=1}^K \left[Q(\bar{\mathbf{x}} + \mathbf{f}_k) - 2Q(\bar{\mathbf{x}}) + Q(\bar{\mathbf{x}} - \mathbf{f}_k) \right] t_{wk}^2. \quad (9)$$

Из (9) и (7) ясно видно, что для расчёта поправочного коэффициента требуется $2K+1$ раз вызвать полную и двухпоточную модели. Обратите внимание на то, что если бы поправочную функцию получали при помощи конечных разностей в исходном пространстве данных, то полную и двухпоточную модели потребовалось бы вызвать $2L+1$ раз. А так как обычно $K \ll L$, то в результате было обеспечено существенное сокращение затрачиваемого на вычисления времени.

Этот подход был использован применительно к моделированию спектров в полосе O2A [71], полосе Хаггинса [34] и полосах CO2 [73, 74]. В [75] аналогичный подход был использован применительно к моделированию энергетической яркости в области спектра, охватывающей УФ, видимый и ближний ИК диапазоны (0,3–3000 нм). Во всех случаях авторы сообщали, что среднеквадратическая погрешность расчётных значений энергетической яркости была порядка 0,01 %, и при этом было достигнуто почти 10-кратное увеличение скорости расчётов. Большим достоинством этого метода является то, что, в отличие от рассмотренных ранее методов, он не требует наличия баз данных, содержащих рассчитанные предварительно спектры.

В [76] эффективность методов снижения размерности входных и выходных данных была рассмотрена применительно к моделированию в полосе Хартли-Хаггинса. Было предложено комбинированное применение этих методов. Методы снижения размерности пространства выходных данных и спектральной выборки были использованы применительно к двухпоточным решениям при помощи соответствующих просмотрных таблиц, тогда как многопоточные вычисления выполнялись применительно к снижению размерности входных данных, которая описана в этом разделе. Было установлено, что комбинированное применение этих методов обеспечивает точность, превышающую 0,05 %, причём скорость выполнения расчётов возрастает примерно в 20 раз.

6.2. Расчёты в случае сокращённого пространства входных данных

Так как задача определения параметров атмосферы является чрезвычайно

Характеристики датчиков состава атмосферы

Прибор	GOME	GOME-2	TROPOMI
Носитель	ERS-2	MetOp (A, B, C)	Sentinel 5 Precursor
Пространственное разрешение, км ²	320×40	80×40	7×3,5
Количество данных 1-го уровня (Тбайт/год)	0,8	4,2	240
Применялся, годы	1995–2011	2006-настоящее время	2017- настоящее время

Рис. 8. Схематическое представление основанного на PCA алгоритма классификации, используемого применительно к гиперспектральным данным



некорректной, то физически правильные результаты можно получить при помощи регуляризации, в рамках которой учитывается ряд априорных сведений. В этом случае снижение размерности пространства входных данных можно рассматривать как особый вид регуляризации, то есть получаемые параметры должны подчиняться определённой зависимости, описанной выбранным набором ЭОФ.

В [77] метод снижения размерности был использован для параметризации коэффициента аэрозольного ослабления с целью его последующего использования в алгоритме обращения, предназначенном для получения соответствующих координат ГК, а не для описания аэрозольного ослабления. На основе теории Ми [78] и алгоритмов, разработанных для ансамблей частиц, была получена система ЭОФ для набора коэффициентов аэрозольного ослабления. И наконец, в [78] снижение размерности было выполнено применительно к пространствам входных (профили температуры и влажности) и выходных (спектральные энергетические яркости) данных, тогда как искусственные нейронные сети использовались для установления взаимосвязей между координатами ГК. Благодаря уменьшению количества независимых параметров, такая схема оказалась более устойчивой и эффективной, чем традиционная.

7. Снижение размерности гиперспектральных данных в задачах классификации

Снижение размерности играет важную роль в алгоритмах классифика-

ции, используемых применительно к гиперспектральным данным. Онлайновое обнаружение аномалий и распознавание объектов на изображениях, получаемых с помощью дистанционного зондирования, имеет чрезвычайно большое значение для мониторинга лесных пожаров и вулканической деятельности. В подобных областях применения приходится решать задачи классификации. В сокращённом пространстве данных количество участвующих в классификации переменных уменьшается, хотя их количество и остаётся большим, чем в исходном пространстве. Поэтому алгоритмы классификации (например, алгоритм « k ближайших соседей») оказываются более устойчивыми и эффективными [80, 81]. PCA можно использовать для визуализации гиперспектральных данных в виде двумерных изображений, идентифицируя при этом участки с определёнными особенностями. Концепция совместного использования PCA и классификаторов проиллюстрирована на рис. 8. Подобный подход используется не только при обработке данных, полученных с борта космического аппарата, но и в других областях применения, таких как материаловедение [82, 83], табачная промышленность [84] и производство продуктов питания [85].

8. Заключение

В обзоре было рассмотрено несколько методов обработки гиперспектральных данных, причём в основу всех этих методов положено снижение размерности. Было показано, что применительно к гиперспектрально-

му моделированию PCA может быть реализован несколькими способами. Поэтому термин «основанная на PCA модель переноса излучения», по-видимому, не годится, так как он не описывает особенности этого алгоритма (например, в [40, 49, 75] представлены абсолютно разные модели, и при этом все они «основаны на PCA»).

Было показано, что концепция снижения размерности может быть положена в основу разработки гиперспектральной МПИ, в которой непосредственно учитывается сильная взаимозависимость спектральных данных. Для более тщательного рассмотрения возможности совмещения описанных в данной работе методов потребуется провести дополнительные исследования. Например, в [86] был описан гибридный подход, совмещающий метод коррелированных k -распределений и снижение размерности входных данных. Подобные модели имеют очень большое значение для обработки больших данных, полученных в результате дистанционного зондирования при реализации текущих проектов, и становятся господствующей тенденцией при разработке атмосферных процессоров нового поколения.

Описанные основы снижения количества гиперспектральных данных общеизвестны и могут использоваться в разных областях применения, включая материаловедение и электронную спектроскопию, что обусловлено схожестью используемых в этих областях методик [87]. Кроме того, PCA является перспективным инструментом для анализа гиперспектральных оптических данных в медицине. В частности, недавние исследования показали, что снижение размерности кубов данных позволяет улучшить алгоритмы распознавания и классификации, что было бы чрезвычайно полезно

для ранней оптической диагностики болезней [88].

Авторы благодарны главному редактору журналов «Светотехника» и «Light & Engineering» проф. В.П. Будаку за приглашение написать этот обзор, а также анонимному рецензенту за внимательное ознакомление с рукописью и ценные предложения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

[1]. D.G. Loyola, S. Gimeno Garcia, R. Lutz, A. Argyrouli, F. Romahn, R.J.D. Spurr, M. Pedernana, A. Doicu, V. Molina Garcá, and O. Schüssler. The operational cloud retrieval algorithms from TROPOMI on board Sentinel-5 precursor. *Atmospheric Measurement Techniques*, 11(1):409–427, 2018.

[2]. C.A. Lee, S.D. Gasster, A. Plaza, C. Chang, and B. Huang. Recent developments in high performance computing for remote sensing: A review. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 4(3):508–527, 2011.

[3]. J.P. Veefkind, I. Aben, K. McMullan, H. Forster, J. de Vries, G. Otter, J. Claas, H.J. Eskes, J.F. de Haan, Q. Kleipool, and et al. TROPOMI on the ESA Sentinel-5 Precursor: A GMES mission for global observations of the atmospheric composition for climate, air quality and ozone layer applications. *Remote Sensing of Environment*, 120:70–83, 2012.

[4]. Y. Ma, H. Wu, L. Wang, B. Huang, R. Ranjan, A. Zomaya, and W. Jie. Remote sensing big data computing: Challenges and opportunities. *Future Generation Computer Systems*, 51:47–60, 2015.

[5]. P. Liu. A survey of remote-sensing big data. *Frontiers in Environmental Science*, 3:45, 2015.

[6]. V.M. Roozendael, R. Spurr, D. Loyola, C. Lerot, D. Balis, J.C. Lambert, W. Zimmer, J. Gent, J. Van Geffen, M.E. Koukoulis, J. Granville, A. Doicu, C. Fayt, and C. Zehner. Sixteen years of GOME/ERS2 total ozone data: the new direct-fitting GOME Data Processor (GDP) Version 5: I. algorithm description. *J Geophys Res: Atmospheres*, 117: D03305(1–18), 2012.

[7]. V. Natraj. A review of fast radiative transfer techniques. In A.A. Kokhanovsky, editor, *Light scattering reviews*, volume 8, pages 475–504. Springer Berlin Heidelberg, 2013.

[8]. D. Efremenko, A. Doicu, D. Loyola, and T. Trautmann. Acceleration techniques for the discrete ordinate method. *J Quant Spectrosc Radiat Transfer*, 114:73–81, 2013.

[9]. D.S. Efremenko, D. Loyola, A. Doicu, and T. Trautmann. Data-intensive computing in radiative transfer modelling. In P. Soille and P.G. Marchetti, editors, *Proc. of the 2016 conference on Big Data from Space (BiDS16)*, pages 188–191, Santa Cruz de Tenerife, Spain, 2016.

[10]. V.P. Budak, G.A. Kaloshin, O.V. Shagalov, and V.S. Zheltov. Numerical modeling of the radiative transfer in a turbid medium using the synthetic iteration. *Opt. Express*, 23(15): A829, 2015.

[11]. D.S. Efremenko, D.G. Loyola, A. Doicu, and R.J.D. Spurr. Multi-core-CPU and GPU-accelerated radiative transfer models based on the discrete ordinate method. *Computer Physics Communications*, 185(12):3079–3089, 2014.

[12]. D.S. Efremenko, D. Loyola, R.J.D. Spurr, and A. Doicu. Acceleration of radiative transfer model calculations for the retrieval of trace gases under cloudy conditions. *J Quant Spectrosc Radiat Transfer*, 135:58–65, 2014.

[13]. R.J.D. Spurr. VLIDORT: A linearized pseudo-spherical vector discrete ordinate radiative transfer code for forward model and retrieval studies in multilayer multiple scattering media. *J Quant Spectrosc Radiat Transfer*, 102(2):316–342, 2006.

[14]. R.J.D. Spurr, T.P. Kurosu, and K.V. Chance. A linearized discrete ordinate radiative transfer model for atmospheric remote-sensing retrieval. *J Quant Spectrosc Radiat Transfer*, 68(6):689–735, 2001.

[15]. K. Pearson. On lines and planes of closest fit to systems of points in space. *Phil Mag*, 2(6):559–572, 1901.

[16]. R. D. Morris, A. Kottas, M. Taddy, R. Furfaro, and B.D. Ganapol. A statistical framework for the sensitivity analysis of radiative transfer models. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 46(12):4062–4074, 2008.

[17]. V.A. Ambartzumyan. The effect of the absorption lines on the radiative equilibrium of the outer layers of the stars. *Publ. Obs. Astron. Univ. Leningrad*, 6:7–18, 1936.

[18]. R.M. Goody, R. West, L. Chen, and D. Crisp. The correlated k-method for radiation calculations in nonhomogeneous atmosphere. *J Quant Spectrosc Radiat Transfer*, 42(6):539–550, 1989.

[19]. W.J. Wiscombe and J.W. Evans. Exponential-sum fitting of radiative transmission functions. *J Comput Phys*, 24(4):416–444, 1997.

[20]. R. West, D. Crisp, and L. Chen. Mapping transformations for broadband atmospheric radiation calculation. *J Quant Spectrosc Radiat Transfer*, 43(3):191–199, 1990.

[21]. E. Boesche, P. Stammes, R. Preusker, R. Bennartz, W. Knap, and J. Fischer. Polarization of skylight in the O2A band: effects of aerosol properties. *Applied Optics*, 47(19):3467, 2008.

[22]. Christiane Helling and Uffe Grae Jorgensen. Optimizing the opacity sampling method. *Astronomy and Astrophysics*, 337:477–486, 1998.

[23]. Frédéric André, Longfeng Hou, Maxime Roger, and Rodolphe Vaillon. The multispectral gas radiation modeling: A new theo-

retical framework based on a multidimensional approach to k-distribution methods. *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*, 147:178–195, nov 2014.

[24]. Boris A. Fomin. A k-distribution technique for radiative transfer simulation in inhomogeneous atmosphere: 1. FKDM, fast k-distribution model for the longwave. *Journal of Geophysical Research*, 109(D2), 2004.

[25]. Boris Fomin. A k-distribution technique for radiative transfer simulation in inhomogeneous atmosphere: 2. FKDM, fast k-distribution model for the shortwave. *Journal of Geophysical Research*, 110(D2), 2005.

[26]. V.A. Falaleeva and B.A. Fomin. Overcoming spectroscopic challenges in direct problems of satellite sounding of the atmosphere. *Atmospheric and Oceanic Optics*, 30(1):1–6, jan 2017.

[27]. B.A. Fomin. Effective interpolation technique for line-by-line calculations of radiation absorption in gases. *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*, 53(6):663–669, jun 1995.

[28]. S. Najmabadi, P. Offenhäuser, M. Hamann, G. Jajnabalkya, F. Hempert, C. Glass, and S. Simon. Analyzing the effect and performance of lossy compression on aeroacoustic simulation of gas injector. *Computation*, 5(4):24, 2017.

[29]. S.T. Roweis and L.K. Saul. Nonlinear dimensionality reduction by locally linear embedding. *Science*, 290(22):2323–2326, 2000.

[30]. M.A. Kramer. Nonlinear principal component analysis using autoassociative neural networks. *AIChE Journal*, 37(2):233–243, 1991.

[31]. A.N. Gorban, B. Kégl, D.C. Wunsch, and A.Y. Zinovyev, editors. *Principal Manifolds for Data Visualization and Dimension Reduction*. Springer Berlin Heidelberg, 2008.

[32]. I.K. Fodor. *A Survey of Dimension Reduction Techniques*. Office of Scientific and Technical Information (OSTI), 2002.

[33]. L.J.P. van der Maaten, E.O. Postma, and H.J. van den Herik. *Dimensionality Reduction: A Comparative Review*. Tilburg University Technical Report, TiCC-TR2009–005, 2009.

[34]. D.S. Efremenko, A. Doicu, D. Loyola, and T. Trautmann. Optical property dimensionality reduction techniques for accelerated radiative transfer performance: Application to remote sensing total ozone retrievals. *J Quant Spectrosc Radiat Transfer*, 133:128–135, 2014.

[35]. F. Pedregosa, G. Varoquaux, A. Gramfort, V. Michel, B. Thirion, O. Grisel, M. Blondel, P. Prettenhofer, R. Weiss, V. Dubourg, J. Vanderplas, A. Passos, D. Cournapeau, M. Brucher, M. Perrot, and E. Duchesnay. Scikit-learn: Machine learning in Python. *Journal of Machine Learning Research*, 12:2825–2830, 2011.

[36]. Robert H. MacArthur. On the relative abundance of bird species. *Proc Natl Acad Sci USA*, 43(3):293–295, 1957.

- [37]. X Liu, W.L. Smith, D.K. Zhou, and A. Larar. Principal component-based radiative transfer model for hyperspectral sensors: theoretical concept. *Applied Optics*, 45(1):201–208, 2006.
- [38]. D. G. Loyola, M. Pedernana, and S. Gimeno Garcia. Smart sampling and incremental function learning for very large high dimensional data. *Neural Networks*, 78:75–87, 2016.
- [39]. J. H. Halton. Algorithm 247: Radical-inverse quasi-random point sequence. *Commun ACM*, 7(12):701–702, 1964.
- [40]. M. Matricardi. A principal component based version of the RTTOV fast radiative transfer model. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 136:1823–1835, 2010.
- [41]. P. D. Hurlley, S. Oliver, D. Farrah, L. Wang, and A. Efstathiou. Principal component analysis and radiative transfer modelling of Spitzer Infrared spectrograph spectra of ultraluminous infrared galaxies. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 424(3):2069–2078, 2012.
- [42]. A. Hollstein and R. Lindstrot. Fast reconstruction of hyperspectral radiative transfer simulations by using small spectral subsets: application to the oxygen A band. *Atmospheric Measurement Techniques*, 7(2):599–607, 2014.
- [43]. U. Platt. Differential optical absorption spectroscopy (DOAS). *Chem Anal Series*, 127:27–83, 1994.
- [44]. U. Platt and J. Stutz. *Differential Optical Absorption Spectroscopy: Principles and Applications*. Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, 2008.
- [45]. G.W. Kattawar, A.T. Young, and T.J. Humphreys. Inelastic scattering in planetary atmospheres. I. The Ring effect, without aerosols. *Astrophys J*, 243:1049–1057, 1981.
- [46]. M. Vountas, V.V. Rozanov, and J.P. Burrows. Ring effect: Impact of rotational Raman scattering on radiative transfer in earth's atmosphere. *J Quant Spectrosc Radiat Transfer*, 60(6):943–961, 1998.
- [47]. James Slusser, Kyle Hammond, Arve Kylling, Knut Stamnes, Lori Perliski, Arne Dahlback, Donald Anderson, and Robert DeMajistre. Comparison of air mass computations. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 101(D5):9315–9321, 1996.
- [48]. Lori M. Perliski and Susan Solomon. On the evaluation of air mass factors for atmospheric near-ultraviolet and visible absorption spectroscopy. *Journal of Geophysical Research*, 98(D6):10363, 1993.
- [49]. Can Li, Joanna Joiner, Nickolay A. Krotkov, and Pawan K. Bhartia. A fast and sensitive new satellite SO₂ retrieval algorithm based on principal component analysis: Application to the ozone monitoring instrument. *Geophysical Research Letters*, 40(23):6314–6318, 2013.
- [50]. R.J.D. Spurr. LIDORT and VLIDORT. Linearized pseudo-spherical scalar and vector discrete ordinate radiative transfer models for use in remote sensing retrieval problems. In A.A. Kokhanovsky, editor, *Light scattering reviews*, volume 3, pages 229–275. 2008.
- [51]. A. Doicu and T. Trautmann. Two linearization methods for atmospheric remote sensing. *J Quant Spectrosc Radiat Transfer*, 110(8):477–490, 2009.
- [52]. P.F. Levelt, G.H.J. van den Oord, M.R. Dobber, A. Malkki, Huib Visser, Johan de Vries, P. Stammes, J.O.V. Lundell, and H. Saari. The ozone monitoring instrument. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 44(5):1093–1101, 2006.
- [53]. A.N. Tikhonov and V.Y. Arsenin. *Solution of Ill-Posed Problems*. Winston, 1977.
- [54]. C.D. Rodgers. *Inverse methods for atmospheric sounding: Theory and Practice*. World Scientific Publishing, 2000.
- [55]. A. Doicu, T. Trautmann, and F. Schreier. *Numerical Regularization for Atmospheric Inverse Problems*. Springer, 2010.
- [56]. D. S. Efremenko, O. Schüssler, A. Doicu, and D. Loyola. A stochastic cloud model for cloud and ozone retrievals from UV measurements. *J Quant Spectrosc Radiat Transfer*, 184:167–179, November 2016.
- [57]. J. Xu, O. Schussler, D.G. Loyola Rodriguez, F. Romahn, and A. Doicu. A novel ozone profile shape retrieval using full-physics inverse learning machine (FP-ILM). *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 10(12):5442–5457, 2017.
- [58]. G. Hughes. On the mean accuracy of statistical pattern recognizers. *IEEE Trans. Inform. Theory*, 14(1):55–63, 1968.
- [59]. W.J. Blackwell and F.W. Chen. *Neural Networks in Atmospheric Remote Sensing*. Lexington, 2009.
- [60]. John Shawe-Taylor and Nello Cristianini. *Kernel Methods for Pattern Analysis*. Cambridge University Press, New York, NY, USA, 2004.
- [61]. G. Camps-Valls, J. Munoz-Mari, L. Gomez-Chova, L. Guanter, and X. Calbet. Nonlinear statistical retrieval of atmospheric profiles from MetOp-IASI and MTG-IRS infrared sounding data. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 50(5):1759–1769, May 2012.
- [62]. Roman Rosipal and Nicole Krämer. Overview and recent advances in partial least squares. In *Subspace, Latent Structure and Feature Selection*, pages 34–51. Springer Science + Business Media, 2006.
- [63]. Peter D. Wentzell and Lorenzo Vega Montoto. Comparison of principal components regression and partial least squares regression through generic simulations of complex mixtures. *Chemometrics and Intelligent Laboratory Systems*, 65(2):257–279, 2003.
- [64]. Saikat Maitra and Jun Yan. Principal component analysis and partial least squares: Two dimension reduction techniques for regression. In *Discussion Papers: 2008 Discussion Paper Program – Applying Multivariate Statistical Models*, pages 79–90. Casualty actuarial society, 2008.
- [65]. H. Hotelling. The most predictable criterion. *Journal of Educational Psychology*, 26:139–142, 1935.
- [66]. D. Wilks. *Statistical Methods in the Atmospheric Sciences, 3rd Edition*. New York: Elsevier, 2011.
- [67]. D.S. Efremenko, D.G. Loyola R., P. Hedelt, and R.J.D. Spurr. Volcanic SO₂ plume height retrieval from UV sensors using a full-physics inverse learning machine algorithm. *International Journal of Remote Sensing*, 38(sup1):1–27, 2017.
- [68]. Pascal Hedelt, Dmitry S. Efremenko, Diego G. Loyola, Robert Spurr, and Lieven Clarisse. SO₂ layer height retrieval from Sentinel-5 Precursor/TROPOMI using FP_ILM. *Atmospheric Measurement Techniques Discussions*, pages 1–23, feb 2019.
- [69]. M.Yu. Kataev, A.K. Lukyanov, and A.A. Bekerov. Modification of the empirical orthogonal functions method for solving the inverse task of retrieving of the CO₂ total content from satellite data. *Journal of Siberian Federal University. Engineering & Technologies*, 11(1):77–85, 2018.
- [70]. M.Y. Kataev and A.K. Lukyanov. Empirical orthogonal functions and its modification in the task of retrieving of the total amount CO₂ and CH₄ with help of satellite Fourier transform spectrometer GOSAT (TANSO-FTS). In G.G. Matvienko and O.A. Romanovskii, editors, *22nd International Symposium on Atmospheric and Ocean Optics: Atmospheric Physics*. SPIE-Intl Soc Optical Eng, 2016.
- [71]. V. Natraj, X. Jiang, R.L. Shia, X. Huang, J.S. Margolis, and Y.L. Yung. Application of the principal component analysis to high spectral resolution radiative transfer: A case study of the O₂A-band. *J Quant Spectrosc Radiat Transfer*, 95(4):539–556, 2005.
- [72]. I.E. Gordon, L.S. Rothman, C. Hill, R.V. Kochanov, Y. Tan, P.F. Bernath, M. Birk, V. Boudon, A. Campargue, K.V. Chance, B.J. Drouin, J.-M. Flaud, R.R. Gamache, J.T. Hodges, D. Jacquemart, V.I. Perevalov, A. Perrin, K.P. Shine, M.-A.H. Smith, J. Tenynson, G.C. Toon, H. Tran, V.G. Tyuterev, A. Barbe, A.G. Császár, V.M. Devi, T. Furtenbacher, J.J. Harrison, J.-M. Hartmann, A. Jolly, T.J. Johnson, T. Karman, I. Kleiner, A.A. Kyuberis, J. Loos, O.M. Lyulin, S.T. Massie, S.N. Mikhailenko, N. Moazzen-Ahmadi, H.S.P. Müller, O.V. Naumenko, A.V. Nikitin, O.L. Polyansky, M. Rey, M. Rotger, S.W. Sharpe, K. Sung, E. Starikova, S.A. Tashkun, J. Vander Auwera, G. Wagner, J. Wilzewski, P. Weiso, S. Yu, and E.J. Zak. The HITRAN2016 molecular spectroscopic database. *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*, 203:3–69, 2017.

[73]. P. Somkuti, H. Boesch, V. Natraj, and P. Kopparla. Application of a PCA-based fast radiative transfer model to XCO₂ retrievals in the shortwave infrared. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 122(19):10,477–10,496.

[74]. V. Natraj, R.L. Shia, and Y.L. Yung. On the use of principal component analysis to speed up radiative transfer calculations. *J Quant Spectrosc Radiat Transfer*, 111(5):810–816, 2010.

[75]. P. Kopparla, V. Natraj, R. Spurr, R. Shia, D. Crisp, and Y.L. Yung. A fast and accurate PCA based radiative transfer model: Extension to the broadband shortwave region. *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*, 173:65–71, 2016.

[76]. Ana del Águila, Dmitry Efremenko, Víctor Molina García, and Jian Xu. Analysis of two dimensionality reduction techniques for fast simulation of the spectral radiances in the Hartley-Huggins band. *Atmosphere*, 10(3):142, mar 2019.

[77]. Y. Timofeyev, A. Polyakov, H. Steele, and M. Newchurch. Optimal eigenanalysis for the treatment of aerosols in the retrieval of atmospheric composition from transmission measurements. *Appl. Opt.*, 42(15):2635, July 2003.

[78]. G. Mie. Beitrage zur optik trueber medien, speziell kolloidaler metalloesungen. *Annalen der Physik*, 330(3):377–445, 1908.

[79]. A. V. Polyakov, Yu.M. Timofeev, and Ya.A. Virolainen. Using artificial neural networks in the temperature and humidity sounding of the atmosphere. *Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics*, 50(3):330–336, 2014.

[80]. Michael T. Eismann, Joseph Meola, and Russell C. Hardie. Hyperspectral change detection in the presence of diurnal and seasonal variations. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 46(1):237–249, 2008.

[81]. Dandan Ma, Yuan Yuan, and Qi Wang. Hyperspectral anomaly detection via discriminative feature learning with multiple-dictionary sparse representation. *Remote Sensing*, 10(5):745, may 2018.

[82]. David B Brough, Daniel Wheeler, and Surya R. Kalidindi. Materials knowledge systems in python – a data science framework for accelerated development of hierarchical materials. *Integrating Materials and Manufacturing Innovation*, 6(1):36–53, mar 2017.

[83]. Sai Kiranmayee Samudrala, Prasanna Venkataraman Balachandran, Jaroslaw Zola, Krishna Rajan, and Baskar Ganapathy-subramanian. A software framework for data dimensionality reduction: application to chemical crystallography. *Integrating Materials and Manufacturing Innovation*, 3(1), jun 2014.

[84]. Pilar B. Garcá-Allende, Olga M. Conde, Ana M. Cubillas, César Jáuregui, and José M. López-Higuera. New raw material discrimination system based on a spatial optical spectroscopy technique. *Sensors and Actuators A: Physical*, 135(2):605–612, apr 2007.

[85]. Juan Xing, Cédric Bravo, Pál T. Jancsó, Herman Ramon, and Josse De Baerdemaeker. Detecting bruises on ‘golden delicious’ apples using hyperspectral imaging with multiple wavebands. *Biosystems Engineering*, 90(1):27–36, jan 2005.

[86]. V. Molina García, S. Sasi, D.S. Efremenko, A. Doicu, and D. Loyola. Radiative transfer models for retrieval of cloud parameters from EPIC/DSCOVR measurements. *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*, 213:228–240, 2018.

[87]. Афанасьев В.П., Будак В.П., Ефременко Д.С., Капля П.С. Применение фотометрической теории светового поля в задачах рассеяния электронов // Светотехника.— 2018.— № 5. — С. 44–50.

[88]. F. Vasefi, N. MacKinnon, and D.L. Farkas. Hyperspectral and multispectral imaging in dermatology. In *Imaging in Dermatology*, pages 187–201. Elsevier, 2016.

Открыта регистрация на конференцию Lux Pacifica 2020

Светотехническая конференция стран Тихоокеанского региона *Lux Pacifica* пройдёт 20–22 апреля 2020 года в Санкт-Петербурге. Организатором конференции выступит ВНИСИ им. С.И. Вавилова при поддержке журнала «Светотехника», Научно-технического совета светотехнической отрасли РФ и Государственного Эрмитажа, в стенах которого и пройдёт мероприятие.

Регистрация на конференцию открыта на сайте www.luxpacifica2020.vnisi.ru. В фокусе конференции — актуальные проблемы светотехники, такие как музейное освещение, незрительные эффекты света, интеллектуальное освещение, фотометрия и колориметрия, и другие. Тезисы на конференцию принимаются до 1 ноября 2019 года, регистрация участников продлится до 15 февраля 2020 года.

www.vnisi.ru

LITE-ON запускает самый мощный в мире УФ-С диод для обеззараживания

Компания *LITE-ON Technology Corp.* объявила о выпуске новой серии мощных УФ-С диодов «W35», у которых единственный кристалл, излучающий в диапазоне 270–280 нм, имеет рекордный поток излучения 130 мВт при токе диода 350 мА и напряжении на нём 6 В (т.е. при мощности 2 Вт). Диоды «W35» имеют размеры корпуса 3,3×3,5 мм и позволяют повышение их тока до 600 мА – для получения потока излучения 220 мВт (при мощности диода около 4 Вт). Не полагаясь только на успехи в области УФ-С кристаллов, *LITE-ON* разработала прогрессивную ультрасовременную технологию корпусирования, позволяющую на 40 % повысить эффективность выведения УФ-С излучения по сравнению с ныне используемой технологией.

Два выпускаемых в настоящее время компанией УФ-С диода серии «G35» (80 мВт при 600 мА) обеспечивают работу потребительской системы очистки воды с производительностью 2 л/мин. (Диоды «G35» дают эффективность обеззараживания свыше 99,99 %.) Более совершенные диоды «W35» производят столь же надёжное обеззараживание при меньшем на 46 % выделении тепла. Они станут очередной вехой на пути развития УФ-С диодов для обеззараживания проточной воды.

LITE-ON предлагает широкий ассортимент УФ диодов, охватывающий диапазоны длин волн от 275 (УФ-С) до 430 нм (УФ-А), разной мощности. Все они имеют степень защиты IP58 и испытаны на обеспечение достаточного для конечного изделия ресурса.

ledinside.com
28.06.2019



Ана дель Агила (Ana del Águila).

Окончила Гранадский университет, Испания (2015 г.). Аспирант (PhD) Германского аэрокосмического центра. Область научных интересов:

атмосферные аэрозоли, лидары, дистанционное зондирование, перенос излучения, анализ больших данных



Дмитрий С. Ефременко (Dmitry S. Efremenko),

PhD, доктор технических наук. Окончил Московский энергетический институт (2009 г.). Научный сотрудник Германского аэрокосмического центра. Область научных интересов:

перенос излучения, дистанционное зондирование, анализ больших данных



Томас Траутманн (Thomas Trautmann), Dr.,

профессор. Руководитель отдела Германского аэрокосмического центра. Область научных интересов:

перенос излучения, рассеяние электромагнитных волн, дистанционное зондирование атмосферы.

Введение магнитного поля в электролюминесценцию органических светоизлучающих приборов, легированных наночастицами $CoFe_2O_4$ ¹

С.П. МУКУР², Б. КАНИМКУРБЕЙ³, А. КОРКМАЗ⁴

² Научно-технический исследовательский совет Турции (TÜBİTAK), Исследовательский центр Мармара, Институт материалов, Коджаэли, Турция

³ Университет Амасья, Амасья, Турция

⁴ Стамбульский университет культуры, Стамбул, Турция

E-mail: selin.piravadili@tubitak.gov.tr

Аннотация

Магнитные наночастицы (МНЧ) феррита кобальта ($CoFe_2O_4$) были успешно получены методом автоматического сжигания (золь-гель процесс) с помощью лимонной кислоты и использованы в излучающем слое органического светоизлучающего диода (ОСД). Размерные, структурные и магнитные свойства наночастиц (НЧ) $CoFe_2O_4$ были исследованы и сравнены с помощью рентгеновской дифракции (РД), сканирующей электронной микроскопии (СЭМ) и магнитометра с вибрирующим образцом (МВО). МНЧ $CoFe_2O_4$ использовались в различных концентрациях (0,5 % от массы, 1,0 % от массы и 2,0 % от массы) в излучающем слое ОСД. Были исследованы яркость, токовая эффективность и характеристики электролюминесценции приборов с и без МНЧ $CoFe_2O_4$. Также во время работы применялось внешнее магнитное поле $B_{внеш}$ к ОСД, легированным МНЧ. Было тщательно изучено влияние МНЧ на характеристики ОСД в поле $B_{внеш}$. В специализированной архитектуре устройства в качестве слоя дырочной проводимости (СДП) используются поли(3,4-этилендиокситиофен) полистиролсульфонат (PEDOT: PSS) и поли(2-метокси-5-(2-этилгексилокси)-1,4-фенилен (МЕН-PPV); в качестве эмиссионного слоя используются ИТО/PEDOT: PSS/МЕН-PPV: $CoFe_2O_4$ /Ca/Al. Полученные результаты изготовленных ОСД были улучшены в присутствии НЧ $CoFe_2O_4$ под действием $B_{внеш}$ за счёт обеспечения плотности состояний в полимерных матрицах. Напряжение включения немного уменьшилось в устрой-

стве, легированном 0,5 % массы МНЧ, по сравнению с устройствами с другими концентрациями МНЧ.

Ключевые слова: магнитное поле, ОСД, электролюминесценция, магнитные наночастицы.

1. Введение

Сфера деятельности органических устройств, основанных на π -сопряжённых органических материалах, быстро совершенствуется. В настоящее время технологии отображения (дисплеи) и полупроводникового освещения на основе органических светоизлучающих диодов (ОСД) являются наиболее имманентной и развивающейся областью [1–3]. Хотя был достигнут важный прогресс в работе ОСД, дальнейшее развитие всё ещё необходимо для завоевания места на рынке. Несбалансированная инжекция заряда, рекомбинация и малая доля синглетных экситонов ограничивают характеристики устройств [4, 5]. Использование различных слоёв инжекции и переноса заряда, которые имеют надлежащий энергетический уровень, или легирование слоёв переноса и эмиссии заряда является рецептом управления и балансировки носителей [4–8]. Разработка устройства и использование наноматериалов являются некоторыми примерами для повышения эффективности ОСД, поскольку синглетные экситоны имеют максимальные значения излучения 25 %, что является ограничением по эффективности устройства [5, 9–14]. Таким образом, существуют различные серьёзные ограничения для разработки ОСД. Недавно были проведены экспериментальные и теоретические исследования, в которых утверждается, что электрон-

но-дырочная рекомбинация зависит от спина [10, 15–21]. В частности, коэффициент рекомбинации повышается за счёт тяжёлых атомов, встроенных в полимеры [22]. Поли(*p*-фенилен винилен) (PPV), полифлуорен (PFO) и их производные являются наиболее часто используемыми полимерами в технологии устройств, но они не имеют тяжёлых атомов в своей основной цепи, а 75 % триплетов электронно-дырочных пар серьёзно ограничивают эффективность устройства. Таким образом, эффективность электролюминесценции (ЭЛ) повышается за счёт преобразования триплетов электронно-дырочных пар в синглетный экситон. Ну с соавторами использовал ферромагнитные нанопроволоки из $CoPt$ в МЕН-PPV и соединения иридия $Ir(ppu)$ для исследования образования экситонов [11]. При применении внешнего магнитного поля нанопроволоки $CoPt$ увеличивают отношение синглет-триплетных экситонов в органических полупроводниках, которые увеличивают отношение синглет-триплет. Легирование магнитных наноматериалов в ОСД на основе сопряжённых полимеров улучшило характеристики [11, 14, 23]. Sun с соавторами легировали магнитные наночастицы (МНЧ) $Co_{70}Fe_{30}$ в эмиссионном слое ОСД [23]. ЭЛ устройства была усилена легированием, а в дальнейшем она была ещё больше усилена, когда к устройству было приложено внешнее магнитное поле. Увеличение доли синглетных экситонов и новых областей захвата магнитным полем усиливало генерацию экситонов. Новаторские исследования были сделаны при открытии эффектов магнитного поля в органических полупроводниках в 1960-х годах [24–27]. За последнее время влияние магнитного поля на устройства на основе трис(8-гидроксихинолин) алюминия (III) (Alq_3) было исследовано различными группами [28–32]. Влияние магнитного поля на органические полупроводники объясняется экситонными [33, 34] и биполярными системами [35]. В экситонной модели магнитное поле изменяет скорости межсистемных переходов и удерживает носители в триплетном состоянии [33, 34]. В биполярной модели поляроны «скакали», а биполярны генерировались в магнитных полях [35].

Феррит кобальта ($CoFe_2O_4$) является разновидностью ферромагнитных

¹ Перевод с англ. А.Ю. Басова

материалов. В последнее время многие академические и промышленные исследования были проведены из-за магнитострикций $CoFe_2O_4$. Магнитострикция материалов вызывает изменение их формы или размеров во время намагничивания. Это свойство дало возможность применения на поверхностях крыльев самолётов, датчиков, коррозии в трубах. В этом исследовании мы рассматриваем эффекты МНЧ $CoFe_2O_4$, легированных МЕН-PPV. Исследования переноса дырок в композите МЕН-PPV и МЕН-PPV: МНЧ $CoFe_2O_4$ были проведены в конфигурации ИТО/PEDOT: PSS/МЕН-PPV: МНЧ $CoFe_2O_4$ /Ca/Al. В этих исследованиях были обнаружены интересные результаты, в том числе и при применении $V_{внеш}$. Легирование МНЧ феррита кобальта в МЕН-PPV снижает подвижность дырок за счёт обеспечения плотности состояний (ПС), новых положений ловушек и открывает путь для сбалансированной инжекции и радиационной рекомбинации носителей заряда для реализации улучшенных характеристик ОСД. Эти результаты описаны в работе.

2. Эксперимент

2.1. Материалы и синтез

Все химические вещества для синтеза аналитического класса, нонагидрат нитрата железа ($Fe(NO_3)_3 \cdot 9H_2O$), тетрагидрат нитрата кобальта ($Co(NO_3)_2 \cdot 4H_2O$), лимонная кислота и раствор аммиака (30 %), использовались без дополнительной очистки. МНЧ $CoFe_2O_4$ были синтезированы, как сообщается в литературе. Стехиометрические количества нитрата железа и нитрата кобальта растворяли в деионизированной воде и выливали

в тигель в молярном соотношении 2:1. При перемешивании этого раствора добавляли 2 г лимонной кислоты для облегчения равномерного распределения солей металлов и разделения ионов металлов [36]. Затем pH доводили до 7,5 путём добавления аммиака к раствору в тигле капля за каплей. Раствор сначала нагревали до образования вязкого геля, и когда температура достигала примерно 150 °С, происходил самораспространяющийся процесс горения. В результате получался серо-чёрный порошок.

2.2. Оборудование

Стеклоподложки, покрытые оксидом индия-олова (толщина 120 нм, 10 Ом/м²), были приобретены у компании *KINTEC Systems Ltd*. Гранулы алюминия и чистый кальций (чистота 99,99 %) были приобретены у компании *Kurt J. Lesker*. PEDOT: PSS и МЕН-PPV (около 40000–70000) были приобретены у *Heraeus Clevios GmbH* и *Sigma-Aldrich* соответственно. PEDOT: PSS фильтровали через мембранный ПВДФ-фильтр 0,45 мкм. Раствор МЕН-PPV готовили в смеси толуола: 1,2-дихлорбензол (3:1) с концентрацией 8 мг/см³ и фильтровали через мембранный ПТФЭ-фильтр 0,45 мкм. Порошок $CoFe_2O_4$ распределяли в бутилбензоате при концентрации 8 мг/мл, и смесь перемешивали в течение 2 часов с использованием ультразвука. Узорчатые стеклоподложки, покрытые оксидом индия-олова, очищали ультразвуком в ацетоне, раствором моющего средства (PCC-54, 2 %, диспергированным в H_2O) и, наконец, деионизированной водой и изопропиловым спиртом. За исключением слоёв дырочной проводимости (СДП), все слои устройства

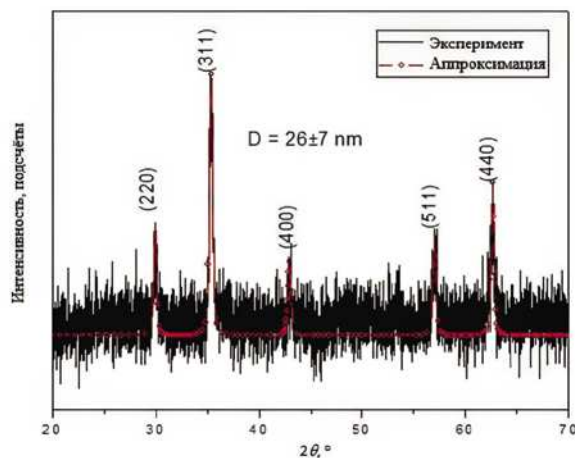
были нанесены в системе перчаточного бокса.

Фотонный многоканальный анализатор *Hamamatsu PMA-12 C10027* и цифровой мультиметр *2427-C3A Keithley* использовались для измерения электролюминесценции, токовой эффективности, яркости и ВАХ в устройствах с различной концентрацией МНЧ. Все устройства были измерены в тёмной камере для образцов, чтобы избежать любого влияния окружающего света. Для определения толщины органических слоёв использовали стилус-профилировщик (*KLA Tencor P-6*). Спектральная плотность коэффициента пропускания для излучения оптического диапазона регистрировали с использованием спектрофлуорометра *FS5 (Edinburg Inst, диапазон длин волн 300–800 нм)*. Изображения с растрового электронного микроскопа (РЭМ) были получены с помощью устройства *Philips XL 30 SFEG*. Распределение элементов и соответствующие спектры были получены с помощью энергодисперсионного рентгеновского спектрометра фирмы *EDAX*. Спектр резонанса электронного спина измеряли с помощью *Bruker ELEXSYS E580*. Магнитные исследования проводили при комнатной температуре с использованием магнитометра с вибрирующим образцом (МВО) (*LDJ Electronics Inc., модель 9600*) во внешнем поле до 15 кЭ. Кристаллическая структура МНЧ была определена с помощью рентгенодифракционных измерений с использованием *Bruker D8 DISCOVER* с дизайном *DAVINCI* с использованием *Cu K α* -излучения в диапазоне 2θ 20–70°. Отливка эмиссионного слоя выполнялась в контролируемой среде N_2 в системе перчаточного бокса. Все устройства в этом исследовании подвергались воздействию воздуха после капсулирования эпоксидной смолой под ультрафиолетовым излучением в течение 3 минут.

2.3. Изготовление устройства

PEDOT: PSS использовался для слоя дырочной инжекции (СДИ). Слой PEDOT: PSS (толщина ~ 60 нм) наносился методом центрифугирования на предварительно очищенное стекло, покрытое оксидом индия-олова, при 4000 об/мин в течение 30 с, а затем выпекался при 120 °С в течение 20 мин. Эта процедура выравнивает

Рис. 1. Порошковая рентгенограмма МНЧ $CoFe_2O_4$



предметные стёкла, избавляет от влаги на поверхности и предотвращает короткие замыкания. МНЧ $CoFe_2O_4$: МЕН-PPV смесь была приготовлена в концентрации 0,5 %, 1,0 % и 2,0 % от массы. Эту смесь наносили (толщина ~ 100 нм) поверх СДИ методом центрифугирования при 1000 об/мин в течение 40 с, а затем выпекали при температуре стеклования (T_g) в течение 20 мин в среде N_2 для испарения растворителей. Наконец, кальций как слой электронной инжекции (~ 15 нм) и катодный слой алюминия (~ 120 нм) были нанесены методом вакуумного испарения (5×10^{-6} мбар). Область активной эмиссии составляла 9,0 мм². Толщина испарённых слоёв измерялась кварцевым монитором. Были изготовлены устройства со структурой оксид индия-олова / PEDOT: PSS / МНЧ: МЕН-PPV / Ca / Al.

3. Результаты и обсуждение

3.1. Рентгенодифракционный анализ МНЧ $CoFe_2O_4$

Структура и фазовая чистота МНЧ $CoFe_2O_4$ были подтверждены путём исследования их рентгенограммы (рис. 1). Все наблюдаемые пики рентгенограммы можно отнести к решётке кубической шпинели, что указывает на однофазную структуру кубической шпинели МНЧ $CoFe_2O_4$. Уширение пиков было обусловлено малым размером кристаллитов. Применялся метод подбора профиля линии, изложенный в работе Wejrzanowski с соавторами [37, 38]: подбор пяти наблюдаемых пиков порошковой рентгенограммы со следующими индексами Миллера: (220), (311), (400), (511) и (440) для расчёта среднего размера кристаллитов. Пики очень хорошо соответствовали файлу порошковой дифракции (ФПД) с номером 00-022-1086. Метод подбора профиля линии показал, что средний размер кристаллитов составлял 26 ± 7 нм.

3.2. РЭМ анализ МНЧ $CoFe_2O_4$

Строение МНЧ $CoFe_2O_4$ было исследовано с помощью изображений с растрового электронного микроскопа (РЭМ). Поверхность МНЧ $CoFe_2O_4$ состоит из тромбоцитов, как показано на рис. 2б. Тромбоцитоподобная структура также наблюдалась в исследовании Venkatesan с соавторами,

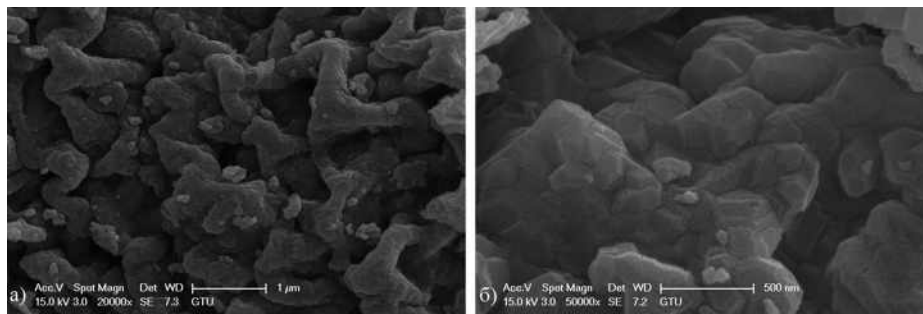


Рис. 2. РЭМ анализ МНЧ $CoFe_2O_4$: а) Увеличение 20000x; б) Увеличение 50000x

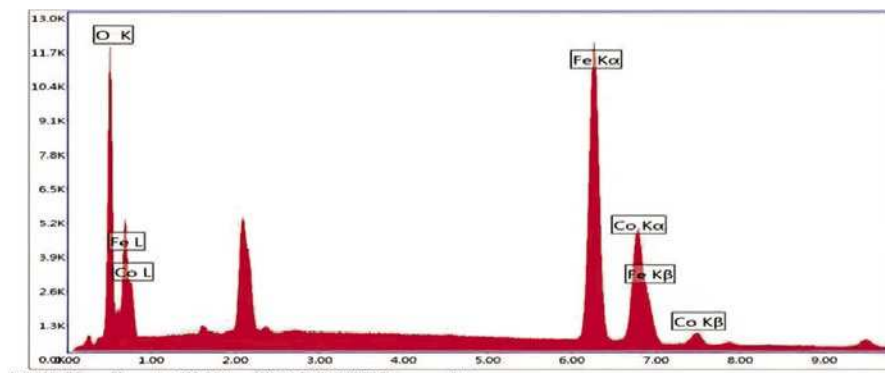
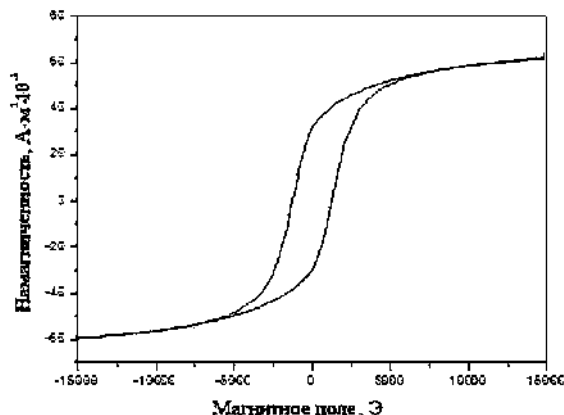


Рис. 3. Распределение частиц и соответствующий спектр были получены с помощью ЭДС EDAX для МНЧ $CoFe_2O_4$, покрытых золотом

Рис. 4. Намагниченность МНЧ $CoFe_2O_4$ как функция приложенного магнитного поля с использованием МВО при 300 К



где МНЧ $CoFe_2O_4$ были синтезированы методом сжигания в растворе. Они предположили, что образование агломерированных частиц было связано с меньшим выделением газа в процессе горения [39]. РЭМ анализ показал агломерацию частиц, которая также может быть связана с магнитным притяжением наночастиц друг к другу. Чтобы подтвердить наличие и состав наночастиц феррита кобальта, конечный продукт описали с помощью энергодисперсионной спектроскопии (ЭДС) в сочетании с модулем РЭМ. Развёртка ЭДС подтвердила наличие $CoFe_2O_4$ с включениями кобальта, кислорода и железа соответственно. В синтезированных МНЧ $CoFe_2O_4$ примесей не обнаружено. Характери-

стика этих четырёх элементов показана на рис. 3.

3.3. МВО анализ МНЧ $CoFe_2O_4$

Намагниченность МНЧ $CoFe_2O_4$ была изучена как функция приложенного магнитного поля с помощью магнитометра с вибрирующим образцом (МВО) при 300 К (рис. 4). Петля гистерезиса намагниченности указала на ферромагнитное поведение МНЧ $CoFe_2O_4$. Кривая зависимости намагниченности от поля $M(H)$ МНЧ $CoFe_2O_4$ регистрировалась при комнатной температуре путём изменения внешнего приложенного поля до ± 15 кЭ. Значение намагниченности насыщения (σ_s) определялось по закону

Рис. 5. Свойства пропускания и поглощения МНЧ тонкой плёнки

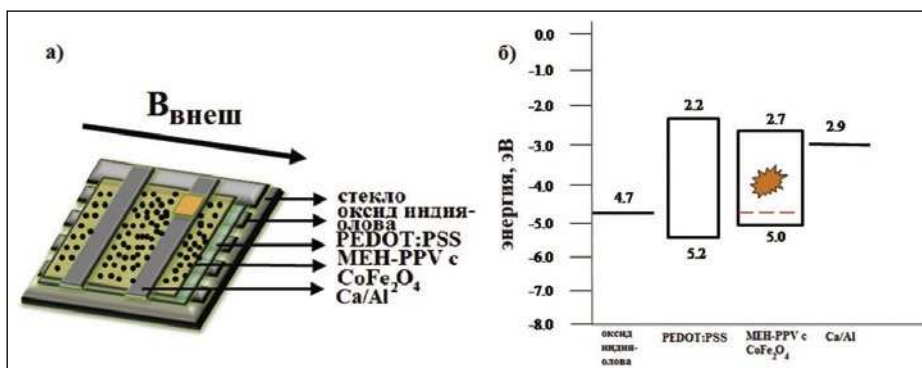
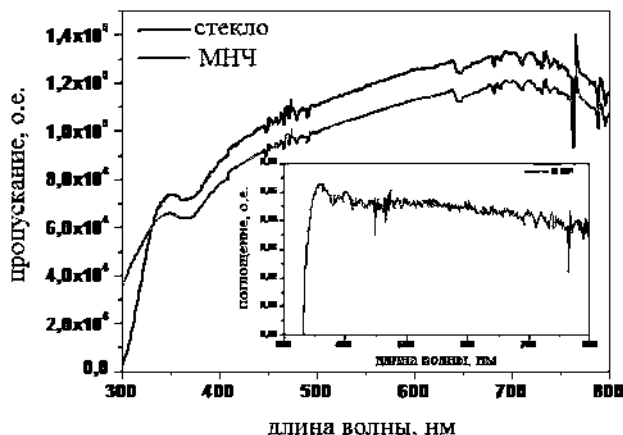


Рис. 6. а) Схематическая структура поперечного сечения ОСД и химическая структура полимера, используемого в исследовании; б) Энергетическая диаграмма ОСД. ВЗМО и НВМО энергетические уровни

приближения к насыщению, который также известен как модель Стонера-Вольфарта (СФ), путём экстраполяции графика зависимости σ (намагниченность) от $1/H^2$ до значения $1/H^2$, равного нулю [40]. Модель СФ учитывает однодоменные и невзаимодействующие частицы, несущие случайно ориентированные направления одноосной анизотропии [41]. На основе упомянутой выше модели СФ максимальное значение намагниченности насыщения (M_n) было определено как $60,78 \text{ Ам}^2\text{кг}^{-1}$, ниже, чем значение M_n $80,8 \text{ Ам}^2\text{кг}^{-1}$ для объёмного CoFe_2O_4 [42]. Остаточная намагниченность (M_o) была определена как $30,69 \text{ Ам}^2\text{кг}^{-1}$, а коэрцитивная сила (H_c) была определена как 1246 Э , что было несколько меньше, чем у объёмного CoFe_2O_4 с коэрцитивной силой при комнатной температуре $5,4 \text{ кЭ}$ [43]. Эти результаты могут быть связаны с оболочкой из спинового стекла, сформированной в виде магнитно мёртвого или инертного слоя на поверхности наночастиц феррита кобальта [42, 43].

Было установлено, что отношение остаточной намагниченности к намаг-

ниченности насыщения (M_o/M_n) составляет $0,50$, что было ожидаемо для системы с невзаимодействующими однодоменными частицами с направлениями одноосной анизотропии [44].

3.4. Фотофизические свойства МНЧ CoFe_2O_4

Фотофизические свойства МНЧ CoFe_2O_4 в тонкой плёнке бутилбензоата, нанесённой методом центрифугирования на стеклянные подложки, были исследованы с помощью УФ-видимого поглощения (рис. 5). Наблюдалось небольшое поглощение и, соответственно, значения пропускания были почти одинаковыми для стеклянных подложек. Эти высокие значения пропускания позволили использовать МНЧ в ОСД приборах.

3.5. Свойства электролюминесценции

Конструкцию изготовленного ОСД устройства можно увидеть на рис. 6а. Процедура изготовления подробно описана в разделе Эксперимент. Из рис. 6б видно, что энергетический

уровень высшей занятой молекулярной орбитали (ВЗМО) полимера МЕН-PPV соответствует энергетическому уровню ВЗМО PEDOT:PSS, таким образом, транспортировка дырок из оксида индия-олова в излучающий слой становится легче. МЕН-PPV также имеет подходящий энергетический уровень нижней вакантной молекулярной орбитали (НВМО) ($-2,75 \text{ эВ}$), который является достаточно высоким для переноса электронов с катода, таким образом, это повышает эффективность рекомбинации электронов и дырок в излучающем слое. Уровень Ферми легированных МНЧ CoFe_2O_4 был на $0,3 \text{ эВ}$ ниже, чем ВЗМО МЕН-PPV. Подобно легированию одностенных углеродных нанотрубок в полимерах [11, 14], может случиться так, что в этой ситуации также дырки могут быть инжектированы в МНЧ и переноситься путём внутреннего скачка через МНЧ. Чтобы исследовать влияние концентрации МНЧ CoFe_2O_4 на характеристики ОСД прибора, эмиссионный слой был легирован МНЧ CoFe_2O_4 в различных концентрациях: $0,5 \%$, $1,0 \%$ и $2,0$ от массы.

Все устройства показали одинаковые значения яркости (рис. 7а), в то время как устройство, легированное $0,5 \%$ МНЧ, имело максимальную световую эффективность и внешний квантовый выход (ВКВ) $0,83 \text{ кд/А}$ и $0,43 \%$ соответственно (рис. 7б и рис. 7г). Характеристики устройства были улучшены при различных концентрациях МНЧ, как показано в табл. 1. На рис. 7 показаны экспериментальные ВАХ приборов при различных концентрациях МНЧ. Значения напряжения при включении устройств немного отличались. Ожидалось, что проводимость и скачки заряда устройства, включая МНЧ, повысят подвижность носителей заряда и приведут к снижению напряжения при включении. В этом исследовании устройства с легированными МНЧ показали более низкое напряжение включения по сравнению с устройством без МНЧ. Напряжение включения устройства для эмиссии фотонов связано с инжекцией неосновных носителей. При низких напряжениях ВАХ показали омическое поведение. Было обнаружено, что при более высоких напряжениях ВАХ определяется проводимостью с ограниченным пространственным зарядом (ПОПЗ).

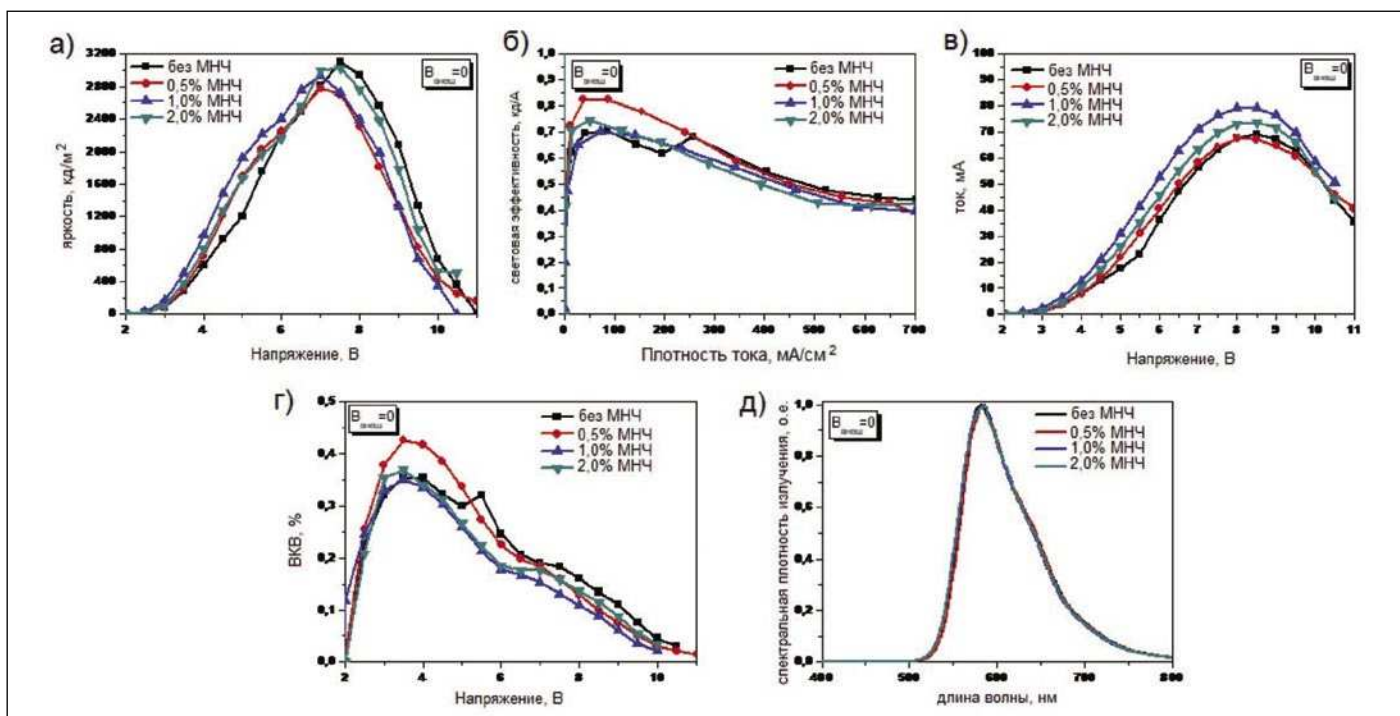


Рис. 7. Характеристики ОСД для различных концентраций МНЧ: а) Зависимость яркости от напряжения; б) Зависимость световой эффективности от напряжения; в) Зависимость тока от напряжения; г) Зависимость ВКВ от напряжения; д) Спектральная плотность излучения в относительных единицах

В ПОПЗ ток прямо пропорционален плотности состояний.

Как видно из рис. 7в, ток приборов с МНЧ был выше, чем у прибора без МНЧ, поэтому концентрация легирования могла бы увеличить плотность состояний. Однако из-за небольшого размера и низкой концентрации частиц в данном случае МНЧ не образовывали локальных проводящих каналов, как в случае с наностержнями. Кроме того, поскольку МНЧ были равномерно распределены по всему слою МЕН-PPV, вероятность внутреннего скачка через частицы была незначительной. Таким образом, наиболее вероятным образом каждая наночастица служила ловушкой для дырок. Поэтому плотность ловушек увеличивалась за счёт легирования МНЧ в МЕН-PPV. Следует отметить, что увеличение результирующей плотности ловушек в смеси не точно соответствовало плотности наночастиц. Прирост в местах ловушек был больше, чем плотность МНЧ в данном случае. В целом, ловушки были созданы в системе легированием/примесями и структурными/межфазными дефектами [42]. При легировании МНЧ в эмиссионном слое также создавались дефектные состояния на интерфейсе МЕН-PPV-МНЧ, которые также могли служить места-

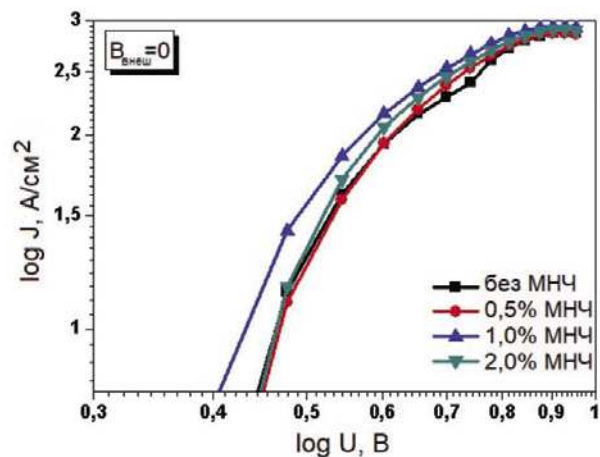
ми ловушек; поэтому количество мест ловушек увеличилось больше, чем плотность МНЧ. Также было важно отметить, что из-за низкого легирования и хорошей дисперсии МНЧ мы исключили возможность образования проводящих каналов и межчастичного взаимодействия в данном случае. Тем не менее, взаимодействие между частицами может играть важную роль при установлении характеристик устройства. Vakuzis и соавторы [43] исследовали взаимодействие между частицами в магнитных жидкостях, содержащих МНЧ. Взаимодействие частиц зависит от их концентрации. Чем выше концентрация частиц, тем меньше расстояние между частица-

ми, что увеличивает взаимодействие между наночастицами.

Спектры ЭЛ изготовленных ОСД показаны на рис. 7д. В спектре ЭЛ наблюдается максимум при ~ 594 нм. Все устройства имели максимум излучения ЭЛ на одной и той же длине волны, то есть МНЧ не влияли на строение и доминирующую длину волны излучаемого света от ОСД.

Кривые $J(V)$ были описаны степенным законом $J \sim V^{m+1}$ в логарифмическом масштабе (рис. 8) для определения механизмов электропроводности приборов. В области низкого напряжения зависимость задана кривой с $m = 1$ для всех устройств, поэтому это поведение может показать вклад тока

Рис. 8. Логарифмические зависимости кривых $J(V)$



Характеристики ОСД прибора в зависимости от концентрации МНЧ в излучающем слое с/без приложенного магнитного поля ($B_{внеш}$)

Конфигурация устройства	Напряжение при включении*, В	Максимальная яркость, кд/м ²	Максимальная световая эффективность, лм/А	ВКВ, %
$B_{внеш}=0$				
Без МНЧ	2,05	3101	0,71	0,35
0,5 % МНЧ от массы	2,04	2279±2,5	0,83±0,03	0,43±0,01
1,0 % МНЧ от массы	2,01	2931±5,7	0,70±0,01	0,35±0,04
2,0 % МНЧ от массы	2,04	3023±6,3	0,75±0,07	0,37±0,04
$B_{внеш} \neq 0$				
0,5 % МНЧ от массы	1,72	2879±0,5	0,87±0,02	0,44±0,03
1,0 % МНЧ от массы	2,02	2935±5,7	0,76±0,09	0,37±0,08
2,0 % МНЧ от массы	2,06	3108±8,8	0,91±0,10	0,47±0,04

* – напряжение при включении определялось как напряжение, когда яркость равна 1 кд/м²; каждая погрешность находилась между пикселями одного и того же устройства

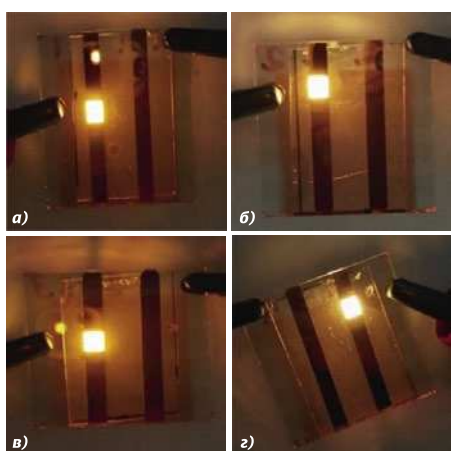


Рис. 9. Выход излучения ОСД при 6В: а) Без МНЧ; б) 0,5 % МНЧ; в) 1,0 % МНЧ; г) 2,0 % МНЧ

дырок как режим проводимости с ограниченным пространственным зарядом (ПОПЗ) без ловушек, определяемый как:

$$J = \frac{9 \varepsilon_0 \varepsilon_r \mu U}{8 L^3}$$

где μ – подвижность зарядов; $\varepsilon_0 \varepsilon_r$ – диэлектрическая проницаемость МЕН-PPV, L – толщина образца. В области высокого напряжения можно наблюдать уменьшение плотности тока, что свидетельствует о распределении ловушек, где электроны были захвачены в основном МНЧ, которые были заполнены во время инъекции заряда в ОСД. При отсутствии механизма окисления на поверхностях МНЧ должны отдать предпочтение инъекции дырок, вызывающей снижение

критического напряжения, поскольку уровень Ферми МНЧ находится между уровнем оксида индия-олова и уровнем ВЗМО эмиссионного слоя.

На рис. 9 изображён выход излучения ОСД с различной концентрацией МНЧ при напряжении 6В.

На рис. 10 представлены характеристики приборов с МНЧ при воздействии $B_{внеш}$. В нашем исследовании было приложено однородное магнитное поле 45 мТл (450 Гс) к действующим легированным приборам. Значения также приведены в табл. 1. Как видно из табл. 1, характеристики всех легированных МНЧ-устройств под $B_{внеш}$ были улучшены. Например, яркость прибора, легированного 0,5 % МНЧ, увеличилась с 2279 кд/м² до 2879 кд/м², в то время как световая эффективность увеличилась с 0,83 кд/А до 0,87 кд/А соответственно. Этот прибор также имел самое низкое напряжение включения среди всех устройств (рис. 7). Эти исследования могут быть применены к другим устройствам, легированным МНЧ. Ранние исследования показали, что магнитные поля могут влиять на процесс триплет-триплетной аннигиляции в органических материалах и могут изменять интенсивность результирующего сигнала замедленной флуоресценции. Кроме того, было обнаружено, что магнитные поля также влияют на фотопроводимость органических плёнок. Наконец, широкий интерес к магнитным явлениям в органике начал возникать, когда было об-

наружено влияние магнитного поля на ток устройства и электролюминесцентные свойства ОСД-приборов [48–50]. В 2003 году Kalinowski с соавторами обнаружил, что в устройствах на основе три-(8-гидроксихинолин)-алюминия (Alq3) с немагнитными электродными материалами применение магнитного поля 500 мТл увеличивает ток, протекающий через приборы, а также их световую отдачу до 3 % [29]. Этот новый феномен начал получать повышенное внимание через год, когда Francis с соавторами продемонстрировал, что в ОСД на основе полифлуорена при комнатной температуре и слабых магнитных полях порядка 10 мТл может быть достигнуто значительное изменение сопротивления более чем на 10 % [31]. Эта публикация ввела термин «эффект органического магнитосопротивления» (эффект ОМС) и запустила несколько исследований в последующие годы. Mermer с соавторами показал, что эффект ОМС является общим явлением и может наблюдаться как в полимерных, так и в низкомолекулярных материалах [32]. Таким образом, улучшение характеристик прибора может быть связано с явлением замедленной флуоресценции из-за триплет-триплетной аннигиляции, поэтому в системе образуется синглетное состояние. Спектры ЭЛ изготовленных ОСД показаны на рис. 10д. В спектре ЭЛ наблюдался пик при ~ 594 нм, такой же, как при $B_{внеш} = 0$. То есть применение $B_{внеш}$ не оказало влияния на характе-

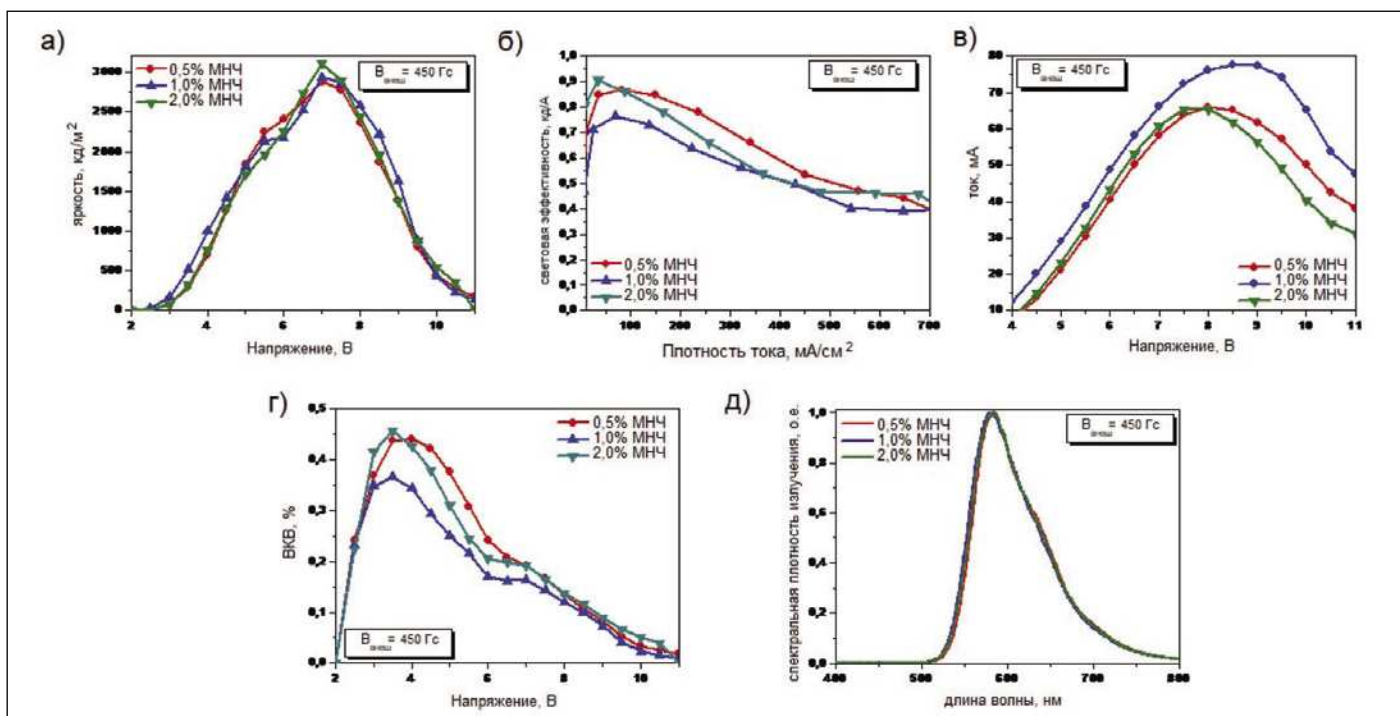


Рис. 10. Характеристики ОСД для различных концентраций МНЧ при приложенном поле $B_{внеш}$: а) Зависимость яркости от напряжения; б) Зависимость световой эффективности от напряжения; в) Зависимость тока от напряжения; г) Зависимость ВКВ от напряжения; д) Спектральная плотность излучения в относительных единицах

ристки излучаемого света, но улучшило характеристики приборов. Desai с соавторами отметил, что слабое магнитное поле может увеличить концентрацию триплета из-за увеличения скорости межсистемного перехода из фотогенерированного синглета в триплетное состояние [44]. При увеличении триплетных экситонов из-за более длительного времени жизни триплетных экситонов по сравнению со временем жизни синглетных экситонов в объёмных материалах диссоциированные носители заряда могут увеличиваться. Приложенное магнитное поле увеличивает межсистемную скорость пересечения, что приводит к увеличению популяции триплетов, что, в свою очередь, увеличивает эффективность.

4. Заключение

В настоящей работе представлено влияние концентрации МНЧ на характеристики ОСД при воздействии $B_{внеш}$. Напоследок были легированы МНЧ $CoFe_2O_4$ в МЕН-PPV, и были реализованы характеристики устройства при различных концентрациях под воздействием магнитного поля. Легирование МНЧ в МЕН-PPV не влияло на характеристики ЭЛ, но увеличивало плотность состояний. Производитель-

ность устройства с МНЧ была улучшена при использовании $B_{внеш}$ в рабочем режиме. Это был важный фундаментальный и прикладной вывод, который может помочь в достижении сбалансированной излучательной рекомбинации носителей заряда и, следовательно, улучшенных характеристик в ОСД.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Köhler A., Wilson J.S., Friend R.H. Fluorescence and phosphorescence in organic materials // *Advanced Engineering Materials*.– 2002. – Т. 4.– № 7.– 453 с.
2. D'Andrade B.W., Forrest S.R. White organic light-emitting devices for solid-state lighting // *Advanced Materials*.– 2004. – Т. 16.– № 18. – С. 1585–1595.
3. Feng J., Okamoto T., Naraoka R., Kawata S. Enhancement of surface plasmon-mediated radiative energy transfer through a corrugated metal cathode in organic light-emitting devices // *Applied Physics Letters*.– 2008. – Т. 93.– № 5.
4. Ahn T., Lee H., Han S.-H. Effect of annealing of polythiophene derivative for polymer light-emitting diodes // *Applied physics letters*.– 2002. – Т. 80.– № 3. – С. 392–394.
5. Misra A., Kumar P., Kamalasanan M., Chandra S. White organic LEDs and their recent advancements // *Semiconductor science and Technology*.– 2006. – Т. 21.– № 7.
6. Seo S.-M., Kim J.H., Park J.-Y., Lee H.H. Coordination-complex polymer as

an organic conductor for organic light-emitting diodes // *Applied Physics Letters*.– 2005. – Т. 87.– № 18.

7. Kim S.Y., Baik J.M., Yu H.K., Kim K.Y., Tak Y.-H., Lee J.-L. Rhodium-oxide-coated indium tin oxide for enhancement of hole injection in organic light emitting diodes // *Applied Physics Letters*.– 2005. – Т. 87.– № 7.

8. Li J.-H., Huang J., Yang Y. Improved hole-injection contact for top-emitting polymeric diodes // *Applied physics letters*.– 2007. – Т. 90.– № 17.

9. Suzuki M., Tokito S., Sato F., Igarashi T., Kondo K., Koyama T., Yamaguchi T. Highly efficient polymer light-emitting devices using ambipolar phosphorescent polymers // *Applied Physics Letters*.– 2005. – Т. 86.– № 10.

10. Baldo M., O'Brien D., Thompson M., Forrest S. Excitonic singlet-triplet ratio in a semiconducting organic thin film // *Physical Review*.– 1999. Т. 60.– № 20.

11. Hu B., Wu Y., Zhang Z., Dai S., Shen J. Effects of ferromagnetic nanowires on singlet and triplet exciton fractions in fluorescent and phosphorescent organic semiconductors // *Applied physics letters*.– 2006. – Т. 88.– № 2.

12. Ruden P.P., Smith D.L. Theory of spin injection into conjugated organic semiconductors // *Journal of applied physics*.– 2004. – Т. 95.– № 9. – С. 4898–4904.

13. Blom P., De Jong M., Breedijk S. Temperature dependent electron-hole recombination in polymer light-emitting diodes // *Applied Physics Letters*.– 1997. – Т. 71.– № 7. – С. 930–932.

14. Xu Z., Wu Y., Hu B., Ivanov I.N., Geoghegan D.B. Carbon nanotube effects on electroluminescence and photovoltaic response in conjugated polymers // *Applied Physics Letters*.– 2005. – Т. 87.– № 26.

15. Cao Y., Parker I.D., Yu G., Zhang C., Heeger A.J. Improved quantum efficiency for electroluminescence in semiconducting polymers // *Nature*.– 1999. – Т. 397.– № 6718. – С. 414–417.

16. Ho P.K., Kim J.-S., Burroughes J.H., Becker H., Li S.F., Brown T.M., Cacialli F., Friend R.H. Molecular-scale interface engineering for polymer light-emitting diodes // *Nature*.– 2000. – Т. 404.– № 6777. – С. 481–484.

17. Wohlgenannt M., Tandon K., Mazumdar S., Ramasesha S., Vardeny Z. Formation cross-sections of singlet and triplet excitons in π -conjugated polymers // *Nature*.– 2001. – Т. 409.– № 6819. – С. 494–497.

18. Wilson J., Dhoot A., Seeley A., Khan M., Köhler A., Friend R. Spin-dependent exciton formation in π -conjugated compounds // *Nature*.– 2001. – Т. 413.– № 6858. – С. 828–831.

19. Shuai Z., Beljonne D., Silbey R., Brédas J.-L. Singlet and triplet exciton formation rates in conjugated polymer light-emitting diodes // *Physical review letters*.– 2000. – Т. 84.– № 1.

20. Kobrak M.N., Bittner E.R. Quantum molecular dynamics study of polaron recombination in conjugated polymers // *Physical Review*.– 2000. – Т. 62.– № 17.

21. Hong T.-M., Meng H.-F. Spin-dependent recombination and electroluminescence quantum yield in conjugated polymers // *Physical Review*.– 2001. – Т. 63.– № 7.

22. Cleave V., Yahioglu G., Barny P.L., Friend R.H., Tessler N. Harvesting singlet and triplet energy in polymer LEDs // *Advanced Materials*.– 1999. –Т. 11.– № 4. – С. 285–288.

23. Sun C.-J., Wu Y., Xu Z., Hu B., Bai J., Wang J.-P., Shen J. Enhancement of quantum efficiency of organic light emitting devices by doping magnetic nanoparticles // *Applied physics letters*.– 2007. – Т. 90.– № 23.

24. Франкевич Е.Л., Балабанов Е.И. Новый эффект увеличения фотопроводимости органических полупроводников в слабом магнитном поле // Письма в ЖЭТФ.– 1965. – Т. 1.– № 6. – С. 33–37.

25. Франкевич Е.Л. О природе нового эффекта изменения фотопроводимости органических полупроводников в магнитном поле // ЖЭТФ.– 1966. – Т. 50.– № 5. – С. 1226–1234.

26. Франкевич Е.Л., Балабанов Е.И. Изменение фотопроводимости монокристалла антрацена в магнитном поле // ФТТ.– 1966. – Т. 8.– № 8. – С. 855–889.

27. Франкевич Е.Л., Балабанов Е.И., Все-любская Г.В. Исследование эффекта изменения фотопроводимости органических полупроводников в магнитном поле // ФТТ.– 1966. – Т. 8. – С. 1970–1973.

28. Kalinowski J., Szymkowski J., Stampor W. Magnetic hyperfine modulation of charge photogeneration in solid films of Alq 3 // *Chemical physics letters*.– 2003. – Т. 378.– № 3. – С. 380–387.

29. Kalinowski J., Cocchi M., Virgili D., Di Marco P., Fattori V. Magnetic field effects on emission and current in Alq 3-based electroluminescent diodes // *Chemical Physics Letters*.– 2003. – Т. 380.– № 5. – С. 710–715.

30. Davis A.H., Bussmann K. Large magnetic field effects in organic light emitting diodes based on tris (8-hydroxyquinoline aluminum)(Alq 3)/N, N'-Di (naphthalen-1-yl)-N, N' diphenyl-benzidine (NPB) bilayers // *Journal of Vacuum Science & Technology A: Vacuum, Surfaces, and Films*.– 2004. – Т. 22.– № 4. – С. 1885–1891.

31. Francis T., Mermer Ö., Veeraraghavan G., Wohlgenannt M. Large magnetoresistance at room temperature in semiconducting polymer sandwich devices // *New Journal of Physics*.– 2004. – Т. 6.– № 1.

32. Mermer Ö., Veeraraghavan G., Francis T., Sheng Y., Nguyen D., Wohlgenannt M., Köhler A., Al-Suti M.K., Khan M. Large magnetoresistance in nonmagnetic π -conjugated semiconductor thin film devices // *Physical Review*.– 2005. – Т. 72.– № 20.

33. Prigodin V., Bergeson J., Lincoln D., Epstein A. Anomalous room temperature magnetoresistance in organic semiconductors // *Synthetic Metals*.– 2006. – Т. 156.– № 9. – С. 757–761.

34. Desai P., Shakya, P. Kreouzis T., Gillin W., Morley N., Gibbs M. Magnetoresistance and efficiency measurements of Al q 3-based OLEDs // *Physical Review*.– 2007. – Т. 75.– № 9.

35. Bobbert P., Nguyen T., Van Oost F., Koopmans v.B., Wohlgenannt M. Bipolaron mechanism for organic magnetoresistance // *Physical Review Letters*.– 2007. – Т. 99.– № 21.

36. Kavas H., Baykal A., Demir A., Toprak M.S., Aktaş B. ZnxCu (1-x) Fe₂O₄ Nanoferrites by Sol-Gel Auto Combustion Route: Cation Distribution and Microwave Absorption Properties // *Journal of Inorganic and Organometallic Polymers and Materials*.– 2014. – Т. 24.– № 6. – С. 963–970.

37. Pielaszek R. Analytical expression for diffraction line profile for polydisperse powders // *Applied Crystallography, in Proceedings of the XIX Conference, World Scientific, Singapore*.– 2004. – С. 43–50.

38. Wejrzanowski T., Pielaszek R., Opalińska A., Matysiak H., Łojkowski W., Kurzydowski K. Quantitative methods for nanopowders characterization // *Applied Surface Science*.– 2006. – Т. 253.– № 1. – С. 204–208.

39. Venkatesan K., Babu D.R., Bai M.P.K., Supriya R., Vidya R., Madeswaran S., Anandan P., Arivanandhan M., Hayakawa Y. Structural and magnetic properties of cobalt-doped

iron oxide nanoparticles prepared by solution combustion method for biomedical applications // *International journal of nanomedicine*.– 2015. – Т. 10.– № 1.

40. Asiri S., Güner S., Demir A., Yıldız A., Manikandan A., Baykal A. Synthesis and Magnetic Characterization of Cu Substituted Barium Hexaferrites // *Journal of Inorganic and Organometallic Polymers and Materials*.– 2018. – Т. 28.– № 3. – С. 1065–1071.

41. Kojima H. Fundamental properties of hexagonal ferrites with magnetoplumbite structure // *Handbook of Ferromagnetic Materials* 3.– 1982. – С. 305–391.

42. Kao K.C., Hwang W. Electrical transport in solids, with particular reference to organic semiconductors // Pergamon Press.– 1981.

43. Bakuzis A., Pereira A., Santos J., Morais P. Superexchange coupling on oleylsarcosine-coated magnetite nanoparticles // *Journal of applied physics*.– 2006. – Т. 99.– № 8.

44. Desai P., Shakya P., Kreouzis T., Gillin W.P. The role of magnetic fields on the transport and efficiency of aluminum tris(8-hydroxyquinoline) based organic light emitting diodes // *Journal of Applied Physics*.– 2007. – Т. 102.– № 7.



Селин Пиравадилли Мукур, в 2015 окончила Технологический Университет Гебзе (Турция) по специальности физика. Область научных интересов: оптоэлектронные материалы и приборы. Является автором около двадцати статей, имеет 2 патента



Бетюль Канимкурбей, доктор физ. наук. Область научных интересов: оптоэлектроника, органические полевые транзисторы, УФ-видимая спектроскопия. Является постоянным участником научных конференций и автором около двух десятков статей



Айше Демир Кормаз, доктор наук, научный сотрудник Стамбульского Университета Мединет. Является автором около 25 статей

Расчёт светораспределения условно точечного источника света в произвольно ориентированной системе координат

С.В. ПРЫТКОВ*, А.О. СЫРОМЯСОВ

НИУ «МГУ им. Н.П. Огарёва», Саранск

* E-mail: sergeyvladi88@gmail.com

Аннотация

Рассматривается задача вычисления суммарного светораспределения нескольких разно ориентированных в пространстве ИС, местоположения которых условно¹ совпадают друг с другом. Предполагается, что индикатрисы силы света ИС описываются в формате *IESNA* (или, что то же самое, в виде таблиц). Предлагаются два метода решения задачи. Первый связан с предварительной тригонометрической интерполяцией индикатрисы силы света каждого ИС, выполняемой с помощью дискретного преобразования Фурье, а второй основан на кусочно-линейной интерполяции этой индикатрисы с использованием триангуляции Делоне. Оба метода реализуемы в распространённых математических пакетах (таких как «*Wolfram Mathematica*» или «*Octave*») и их пригодность проверена экспериментально.

Ключевые слова: угловое распределение силы света, суммарное светораспределение, фотометрические данные, тригонометрическая интерполяция, дискретное преобразование Фурье, кусочно-линейная интерполяция, триангуляция Делоне, поворот системы координат, преобразование координат.

Введение

Несколько лет назад в научных публикациях стал наблюдаться интерес к идее проектирования осветительных приборов (ОП) с единицами-десятками светодиодов (СД) или СД модулей со вторичной оптикой, имеющих разную ориентацию в пространстве [1–4]. Такой подход имеет два преимущества. Во-первых, он позволяет создавать ОП с фотометрическим телом (ФТ) любой сложности с ис-

пользованием вторичной оптики простой геометрии. Во-вторых, обеспечивая в конструкции ОП с СД возможность «поворачивания» отдельных СД (СД модулей), можно оптимизировать его светораспределение в зависимости от условий освещения.

Правда, за последнее десятилетие существенно расширилась номенклатура вторичной оптики для светильников с СД уличного освещения, и потому указанный подход к разработке светильников этой категории, по сути, потерял актуальность. Вместе с тем, по нашему мнению, он по-прежнему актуален, например, в разработках ригельных светильников для освещения объектов железнодорожного транспорта и производственных помещений и светильников для архитектурного освещения зданий и сооружений. Соответственно, по-прежнему актуальны исследования по нахождению суммарного углового распределения силы света (пространственного светораспределения) системы разноориентированных ИС, у которых известны ФТ (или, что то же, индикатрисы силы света).

Решение задачи существенно осложняется тем, что ФТ исходных ИС трёхмерны. Даже в недавней работе по математическому моделиро-

ванию СД модулей [5] рассматривается зависимость светораспределения от одного полярного угла, т.е. фактически решается двумерная задача.

К настоящему времени известен метод, разработанный С.Г. Ашурковым и А.А. Барцевым [1], который позволяет решать трёхмерную задачу при условии осесимметричности исходных ФТ ИС. В настоящей статье предлагается два способа решения этой задачи, но уже без указанного ограничения, т.е. при несимметричности исходных ФТ ИС.

Постановка задачи о расчёте суммарного светораспределения

Известно, что ФТ точечного ИС есть функция $I(\vec{e})$, выражающая зависимость значений силы света I от направления \vec{e} . Последнее можно определять двумя углами в одной из систем (A, α) , (B, β) или (C, γ) [6]. С точки зрения математики построение ФТ есть изображение поверхности в сферической системе координат, где I играет роль радиуса, а угловые координаты зависят от выбора системы фотометрирования.

Как правило, ФТ находится по данным измерений на гониофотометре, представляемым в формате *IESNA* [7] – по сути, в виде таблицы, в которой значения угловых координат приведены с определённым шагом и значения силы света соответствуют каждой паре таких координатных значений.

Обозначим через Θ и Φ угловые координаты в некоторой сферической системе (рис. 1), $\Theta \in [0^\circ, 180^\circ]$ и $\Phi \in [0^\circ, 360^\circ]$, и пусть измерения ведутся с шагом $\Delta\Theta$ по первому углу и $\Delta\Phi$ – по второму. Введя следующие обозначения:

$$\Theta_k = k\Delta\Theta, \Phi_l = l\Delta\Phi, \quad (1)$$

где $k = 0-N_\Theta$, $l = 0-N_\Phi$, $N_\Theta = 180^\circ/\Delta\Theta$ и $N_\Phi = 360^\circ/\Delta\Phi$, получим, что известными являются величины

$$i_{kl} = I(\Theta_k, \Phi_l). \quad (2)$$

Далее рассмотрим несколько ИС, расположенных в одной точке, ФТ каждого из которых известна и задана равенствами (1) и (2). При этом все ФТ описаны в одной и той же системе фотометрирования, например, (C, γ) , роль угла γ в которой играет

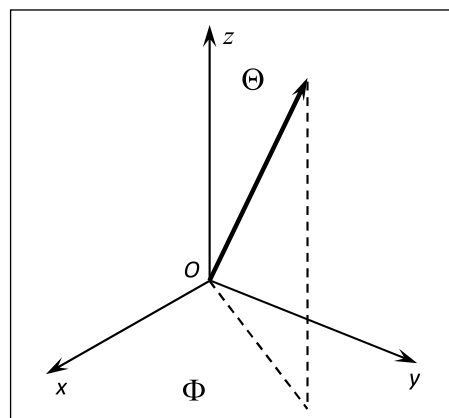


Рис. 1. Угловые координаты в сферической системе

¹ Условно находятся кучно на большом расстоянии от фотоприёмника.

Θ , а роль угла $\Phi - C$. (Логично предполагать также, что шаги $\Delta\Theta$ и $\Delta\Phi$ при измерении являются общими для всех ИС, хотя это предположение и не критично.)

ИС являются пространственно разно ориентированными и светораспределение каждого из них описано в собственной системе координат, жёстко связанной с данным конкретным ИС. При этом взаимное расположение ИС известно, т.е. известна последовательность поворотов, позволяющая совместить собственные системы координат.

Ставится задача: найти суммарное светораспределение вышеописанных условно точечных ИС.

В связи с несовпадением систем координат непосредственно сложить значения i_{kl} разных ИС в соответствующих узлах сетки невозможно. Требуется предварительно выбрать некую общую систему координат, пересчитать в ней функции $I(\vec{e})$ для каждого ИС и лишь затем выполнить сложение. Для сокращения вычислений в качестве общей системы можно выбрать собственную систему координат одного из ИС.

Ниже описаны два метода решения поставленной задачи и приведено описание экспериментальной установки, с помощью которой были подготовлены входные данные для проверки произведённых теоретических выкладок и выполнено сравнение методов.

Использование тригонометрической интерполяции

Пусть аналитическое выражение для ФТ каждого ИС известно:

$$I_j = I_j(\Theta, \Phi), j = 1-N, \quad (3)$$

где N – общее число ИС, индекс j используется для их нумерации, а углы Θ и Φ соответствуют собственной системе координат j -го ИС.

Поскольку формулы преобразований, совмещающих собственные системы разных ИС, известны, то можно найти зависимость между угловыми координатами в собственной системе и её координатами θ и φ в общей системе (в которой и будет происходить сложение ФТ ИС). Для j -го ИС указанная зависимость будет иметь вид

$$\Theta = T_j(\theta, \varphi), \quad \Phi = F_j(\theta, \varphi), \quad (4)$$

Согласно выражениям (3) и (4), суммарное светораспределение N ИС в упомянутой общей системе координат выразится как

$$I(\theta, \varphi) = I_1(T_1(\theta, \varphi), F_1(\theta, \varphi)) + \dots + I_N(T_N(\theta, \varphi), F_N(\theta, \varphi)). \quad (5)$$

Более подробно указанный подход был описан в [8], а в данной работе построены модельные примеры его применения.

Для реализации указанного подхода требуется восстановить функции (3) по исходным данным вида (1)–(2).

Ранние попытки решения данной задачи описаны в [9]. ФТ раскладывалась по степеням $\cos\theta$. Недостатки этого решения – учёт лишь одной угловой переменной (т.е. переход из пространства в плоскость) и малое число слагаемых в разложении (всего 4). В недавней работе [5] авторы повысили точность таких разложений, многократно увеличивая число слагаемых и совершенствуя методы поиска коэффициентов в такого рода суммах, но проблема перехода из плоскости в пространство осталась ими нерешённой.

Возможные подходы к решению указанной проблемы, разные по точности и трудоёмкости, описаны в [3, 10]. Обстоятельством, которое необходимо учитывать при интерполяции фотометрических данных, служит периодичность ФТ (3) по их аргументам: очевидно, период функций I_j по переменной Θ должен составлять 180° , а по $\Phi - 360^\circ$. Поэтому логично искать эти функции в виде двойных тригонометрических рядов по Θ и Φ .

Набор данных вида (1)–(2) конечен, поэтому фактически речь идёт о тригонометрических многочленах с $(N_\Theta + 1) N_\Phi$ слагаемыми; коэффициенты этих многочленов подлежат определению:

$$I(\Theta, \Phi) = \sum_m \cos m\Theta \sum_n (a_{mn} \cos(n\Phi) + b_{mn} \sin(n\Phi)). \quad (6)$$

В реальных фотометрических экспериментах шаги $\Delta\Theta$ и $\Delta\Phi$ малы, и поэтому число неизвестных весьма велико: так, при $\Delta\Theta = 1^\circ$ и $\Delta\Phi = 5^\circ$ оно равно 13032. В связи с этим возникает вопрос о наиболее быстром и при этом точном методе тригонометрической интерполяции.

Как показано в [4], таковым является метод с использованием дискретного преобразования Фурье. В своём простейшем варианте оно позволяет приближённо восстанавливать периодическую функцию по её известным значениям. При этом для последовательности $\{x_k\}$ с периодом N дискретное преобразование Фурье задаётся формулой

$$X_n = \sum_{k=0}^{N-1} x_k \exp(-i \frac{2\pi nk}{N});$$

тогда непрерывная функция

$$x(t) = \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} X_n \exp(i \frac{2\pi nt}{N\Delta t})$$

периодична, причём $\{x_k\}$ – её значения, полученные при значениях t , взятых с шагом Δt [11].

Указанное преобразование, обобщённое для периодической по двум переменным функции, и следует применить к набору данных (2), после чего надо выделить действительную часть в полученном выражении и затем сократить число слагаемых, исключив из суммы все выражения, коэффициенты a_{mn} и b_{mn} в которых меньше некоторого наперёд заданного числа (оно определяется с учётом желаемой точности).

Итак, согласно первому алгоритму вычисления суммарного светораспределения нескольких ИС по результатам фотометрических экспериментов, следует:

- применив дискретное преобразование Фурье к данным (1)–(2), найти светораспределение (3) каждого ИС в его собственной системе координат;
- зная взаимное расположение ИС, конкретизировать преобразования (4),

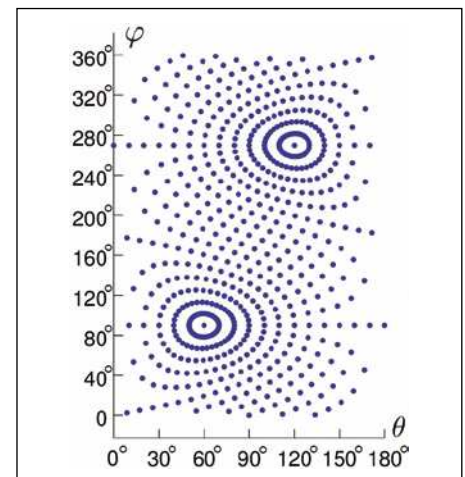


Рис. 2. Искажение регулярной сетки после поворота на 60° вокруг оси Oy

связывающие угловые переменные в собственных системах координат ИС и в общей;

- вычислить суммарное светораспределение (общее ФТ) в общей системе координат по формуле (5).

Непосредственным результатом этих действий будет некая (весьма громоздкая) формула, выражающая искомую функцию $I(\theta, \varphi)$. Последняя может казаться неудобной, но её можно с пользой использовать для составления таблицы значений вида (2), и с её помощью получить выражение вида (6) в общей системе координат.

Использование кусочно-линейной интерполяции

Если ФТ (3) каждого отдельно взятого ИС не представляют интереса, применения дискретного преобразования Фурье можно попытаться избежать. При этом следует сразу перейти к общей системе координат. Угловые координаты, которым после этого перехода соответствуют измеренные силы света i_{kl} , могут определяться из системы (4), разрешаемой относительно θ и φ :

$$\begin{aligned} \theta &= t_j(\Theta, \Phi), \quad \varphi = f_j(\Theta, \Phi), \\ j &= 1-N. \end{aligned} \quad (7)$$

После подстановки в (2) и (7) значений Θ_k и Φ_l для всех N ИС получится таблица значений силы света вида

$$i_{kl} = I_j(\Theta_k, \Phi_l), \quad (8)$$

где, согласно (7), $\theta_k = t_j(\Theta_k, \Phi_l)$ и $\varphi_l = f_j(\Theta_k, \Phi_l)$.

Поскольку разным ИС соответствуют разные функции t_j и f_j , то одни и те же углы Θ_k и Φ_l после преобразования координат переходят в разные углы θ_k и φ_l . В итоге сложение i_{kl} , отвечающих разным ИС, сразу после поворота невозможно. Этой проблемы не возникло при использовании аналитических выражений (3), т.к. они позволяют находить I_j в любой точке. Поэтому для всех повороченных ИС следует выполнять интерполяцию – определять силы света разных ИС в одних и тех же точках

$$\theta_p = p\Delta\Theta, \quad \varphi_q = q\Delta\Phi, \quad (9)$$

где шаги изменения угловых переменных в собственных и общей системах координат удобно выбирать совпадающими.

Сетка Θ_k, Φ_l , покрывающая область $[0^\circ; 180^\circ] \times [0^\circ; 360^\circ]$, после поворота перестаёт быть регулярной (рис. 2).

Среди методов, применимых к данным сеткам, кусочно-линейная интерполяция наиболее проста и при достаточном числе узлов сетки обеспечивает приемлемую точность. Поэтому далее используется именно этот метод. Для его реализации предварительно требуется выполнить триангуляцию области по узлам полученной нерегулярной сетки, выяснить, в какой из треугольников разбиения попадает та или иная точка (9), и найти I_j в этой точке, зная i_{kl} в вершинах треугольника.

Абсолютная погрешность при такой интерполяции известна [3]: внутри каждого треугольника она не превышает $M \cdot h^2/6$, где M – наибольшее значение вторых производных аппроксимируемой функции, h – диаметр описанной окружности треугольника. Чтобы снизить погрешность, требуется минимизировать h . В связи с этим для минимизации погрешности разбиение указанной области производится с помощью триангуляции Делоне [12]. При таком подходе ни один узел сетки не попадает внутрь описанной окружности любого построенного треугольника. Характерной чертой триангуляции Делоне служит минимальность суммы радиусов описанных окружностей всех треугольников. Следовательно, именно этот подход «в среднем» обеспечивает наименьшую погрешность.

Достоинство данного алгоритма и в том, что он встроен во многие математические пакеты, например «Mathematica» [13] или «Octave», и не требует дополнительного программирования.

Окончательно, второй алгоритм расчёта суммарного светораспределения состоит в последовательном выполнении следующих шагов:

- Переход к общей системе координат по формулам (7) и (8).
- Разбиение расчётной области при помощи триангуляции Делоне.
- Кусочно-линейная интерполяция фотометрических данных всех ИС в одних и тех же точках (9).

- Сложение сил света разных ИС в точках (9).

Результатом выполнения данного алгоритма служит таблица суммарных значений силы света.

Реализация этого плана действий связана с некоторыми трудностями.

Во-первых, в собственных системах координат результаты фотометрии при $\Theta = 0^\circ$ дают разные силы света при разных углах Φ , хотя, исходя из введения сферической системы координат, эти значения должны быть одинаковыми (рис. 1). Аналогичное утверждение верно при $\Theta = 180^\circ$. Этот эффект может объясняться как вибрацией гониофотометра при измерениях, так и тем, что светильник в разные моменты времени может давать больше или меньше света, а фотометрические измерения не происходят мгновенно.

При использовании дискретного преобразования Фурье это явление не критично, ибо ключевое значение имеет регулярность расположения точек (Θ_k, Φ_l); а при кусочно-линейной интерполяции оно играет отрицательную роль. Вследствие этого сила света каждого ИС в одной точке принимает несколько значений, что делает интерполяцию невозможной.

Чтобы решить данный вопрос, угол $\Theta = 0^\circ$ в таблицах фотометрических данных заменяется на $\Delta\Theta/100$, а угол $\Theta = 180^\circ$ – на $(180^\circ - \Delta\Theta/100)$. В результате разные значения силы света в окрестностях $\Theta = 0^\circ$ и 180° соответствуют разным (хотя и близко расположенным) точкам пространства.

Во-вторых, если исходная сетка (1) в собственной системе координат того или иного ИС покрывает всю область $[0^\circ; 180^\circ] \times [0^\circ; 360^\circ]$, то нерегулярная

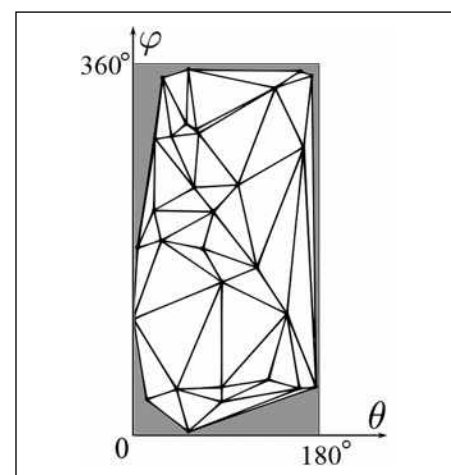


Рис. 3. Неполное покрытие области $[0^\circ; 180^\circ] \times [0^\circ; 360^\circ]$ нерегулярной сеткой



Рис. 4. Источники света, использованные в фотометрическом эксперименте: а – ИС 1; б – ИС 2

рачивания в горизонтальной и вертикальной плоскостях: $\pm 180^\circ$, точность установки угла поворота: $0,1^\circ$); фотометр *ID-1000*, на основе кремниевого фотодиода, скорректированный под функцию $V(\lambda)$, класса точности «L»; источник питания *DPS1060*.

Все фотометрические данные, использованные в дальнейших расчётах, представляют собой среднее арифметическое результатов 5 измерений.

Фотометрирование производилось в системе (C, γ) . Шаг измерения для плоскости C составлял 5° , а для плоскости $\gamma - 1^\circ$. Экспериментальные ФТ каждого ИС представлены на рис. 5.

Для измерения суммарного светораспределения указанных источников ИС 1 был установлен таким образом, чтобы его геометрическая ось была параллельна оси фотометрирования, а у ИС 2 ориентация была задана последовательностью поворачиваний его геометрической оси: вокруг оси Ox на 46° , а затем вокруг оси Oz на 190° . Общая система координат была связана с ИС 1. Суммарное ФТ, полученное в результате измерений, представлено на рис. 6.

Сравнение расчётных методов

Критериями сравнения расчётных методов служили простота реализации алгоритмов, быстрота их работы и точность.

Оба метода были реализованы в системе «*Wolfram Mathematica*». Исходные фотометрические данные были импортированы из *XLS*-файла с помощью встроенных функций этого математического пакета. Как дискретное преобразование Фурье, так и кусочно-линейная интерполяция на нерегулярной сетке также являются стандартными функциями данного ПО, причём при этой интерполяции «*Mathematica*» использует триангуляцию Делоне. С учётом этих обстоятельств трудоёмкость программирования для обоих методов в указанном пакете примерно одинакова.

То же самое можно сказать и об их быстродействии. Расчёты выполнялись на ноутбуке с процессором *Intel Core i7-4500U Haswell* с тактовой частотой 2400 ГГц, имеющем 6 ГБ ОЗУ и находящемся под управлением операционной системы *Win 8.1 x64*. В обоих случаях вычисления заняли 15–20 мин, при этом суммарное светораспределение, рассчитан-

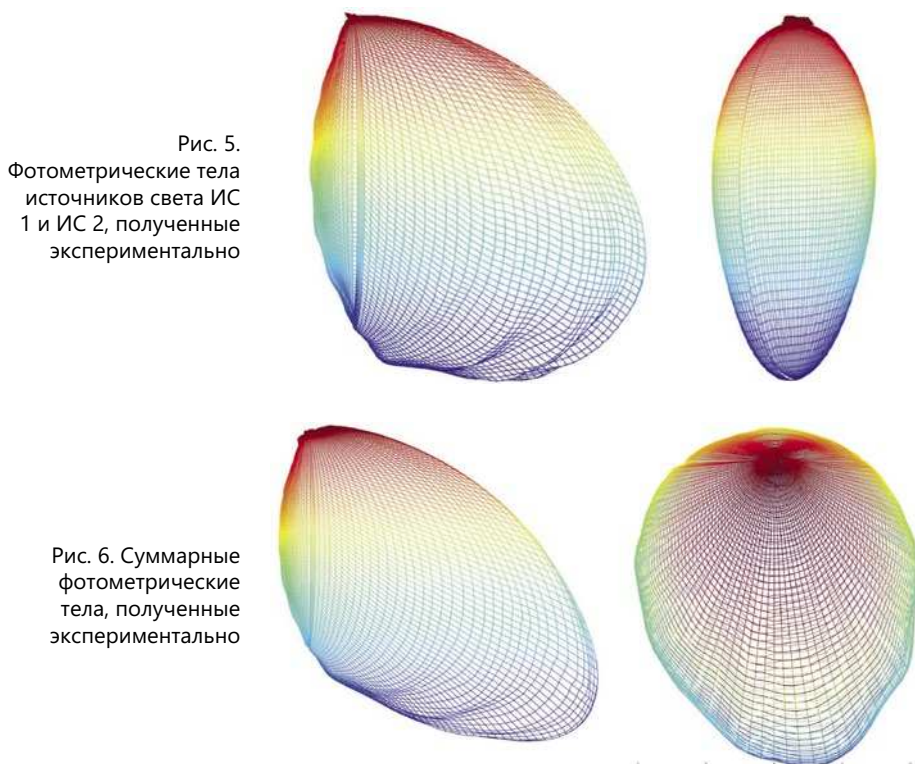


Рис. 5. Фотометрические тела источников света ИС 1 и ИС 2, полученные экспериментально

Рис. 6. Суммарные фотометрические тела, полученные экспериментально

сетка в общей системе, полученная с помощью преобразований (7), «отступает» от её краёв (рис. 3).

В районах, не накрытых сеткой, вместо интерполяции приходится применять экстраполяцию, что ведёт к большим погрешностям.

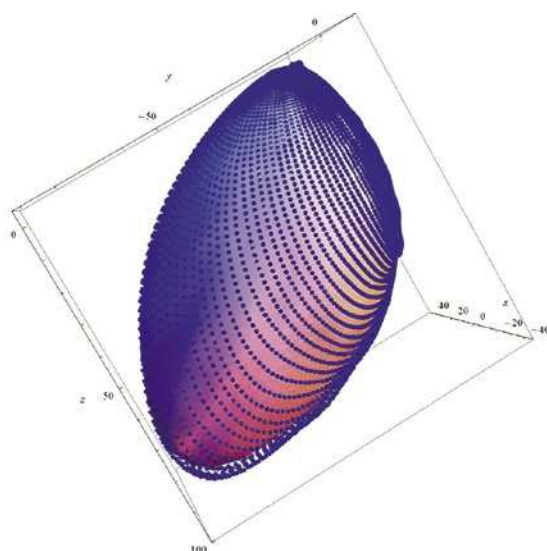
Для решения этого вопроса исходная (регулярная) сетка расширяется, причём используются периодичность функций $I_j(\theta, \phi)$ по обоим переменным и их чётность относительно θ . Так, например, вместо диапазона $[0^\circ, 360^\circ]$ рассматриваются пределы изменения угла ϕ от $-10\Delta\phi$ до $360^\circ + 10\Delta\phi$. Как показывает практика, описанного расширения достаточно для полного покрытия области $[0^\circ; 180^\circ] \times [0^\circ; 360^\circ]$ нерегулярной сеткой в общей системе координат.

Описание эксперимента

Реальные данные, необходимые для проведения сравнительного анализа описанных выше методов, были получены в ходе гониофотометрического эксперимента. На рис. 4 представлены участвовавшие в эксперименте СД ИС. Первый из них (ИС 1) – кососвет, изготовленный на базе СД лампы *Feron 3602 LB-24 MR16*, а второй (ИС 2) – сопоставимая с ИС 1 по мощности СД лампа для акцентного освещения с осесимметричным светораспределением.

Распределение силы света измерялось при нормальных условиях посредством гониофотометрического комплекса *GO2000A*, содержащего: гониометр *GO2000A* (диапазон пово-

Рис. 7. Суммарное светораспределение, полученное с помощью тригонометрической интерполяции. Точки – экспериментальные данные, сплошная поверхность – результат расчёта



ное по обоим методам, было весьма близко к экспериментально наблюдаемому (рис. 7).

Критерием точности служила относительная погрешность вычисления значений суммарной силы света двух ИС по сравнению с её экспериментальными (измеренными) значениями I_{pq} в точках (9). Сравнение расчётных и опытных данных производилось лишь в области $I_{pq} \geq I_{max} / 2$, где I_{max} – наибольшая измеренная суммарная сила света. Такое ограничение позволяет не рассматривать районы, фактически не освещаемые ИС [3]. С другой стороны, именно в этих местах, не представляющих интереса с технической точки зрения, относительная погрешность может резко возрастать за счёт малости измеряемых значений.

В выбранной области максимальная погрешность при использовании тригонометрической интерполяции составила менее 4 %, а при использовании кусочно-линейной интерполяции – около 6,5 %.

Заключение

В статье предложены и проанализированы два метода вычисления суммарного светораспределения нескольких разноориентированных ИС, местоположения которых совпадают друг с другом. Первый связан с тригонометрической интерполяцией фотометрических данных, а второй – с их кусочно-линейной интерполяцией.

При проведении численного эксперимента с использованием реальных фотометрических данных тригонометрическая интерполяция оказалась бо-

лее точной. При этом её погрешность частично связана с исключением малых слагаемых из выражений вида (6). Поэтому она может быть ещё уменьшена путём удержания в них большего числа слагаемых, правда, в ущерб быстродействию метода.

У метода кусочно-линейной интерполяции резервов для повышения точности, при заданном наборе данных вида (2), нет.

Следует отметить, что ФТ, описываемые с помощью формул типа (3) и найденные путём тригонометрической интерполяции, могут иметь самостоятельную ценность. Будучи однажды полученными, они могут в дальнейшем не раз применяться в разных расчётах, например, по преобразованию систем фотометрирования.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ашурков С.Г., Барцев А.А. Метод расчёта фотометрического тела излучателей со светодиодами разной пространственной ориентации // Светотехника. – 2007. – № 1. – С. 43–44.
2. Коваленко О.Ю., Захаржевский О.А., Афонин В.В. Моделирование светодиодного модуля по заданной кривой силы света / Системы проектирования, моделирования, подготовки производства и управление проектами CAD/CAM/CAE/PDM: II Междунар. научно-практич. конф.: Сборник статей. – Пенза: АНОО «Приволжский Дом знаний», 2008. – С. 30–33.
3. Сыромясов А.О., Прытков С.В. Аппроксимация фотометрических данных тригонометрическими полиномами одной переменной // Альманах современной науки и образования. – 2014. – № 5–6 (84). – С. 117–122.
4. Сыромясов А.О. Расчёт светораспределения точечных источников с помощью дискретного преобразования Фурье // Аль-

манах современной науки и образования. – 2014. – № 9 (87). – С. 127–131.

5. Kaljun D., Novak T., Žerovnik J. Improved approximation of spatial light distribution // PLoS ONE. – 2017. – N12(4): e0176252. URL: <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0176252> (дата обращения: 22.04.2019).

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

7. IESNA LM-63–95 «IESNA Recommended Standard File Format for Electronic Transfer of Photometric Data».

8. Аирияттов А.А., Прытков С.В., Сыромясов А.О. Метод расчёта пространственного светораспределения системы разноориентированных светодиодных излучателей // Компьютерные исследования и моделирование. – 2014. – Т. 6, № 4. – С. 577–584.

9. Сапожников Р.А. Теоретическая фотометрия. – 3-е изд., перераб. и доп. – М.: Энергия, 1977. – 264 с.

10. Сыромясов А.О., Прытков С.В. О методах интерполяции на основе фотометрических данных на плоскости / Материалы XI Международной научно-практической конференции «Интеграция науки и практики как механизм эффективного развития современного общества». – Москва, 2014. – С. 13–17.

11. Сергиенко А.Б. Цифровая обработка сигналов. – СПб: Питер, 2002. – 608 с.

12. Скворцов А.В. Триангуляция Делоне и её применение. – Томск: Изд-во Том. ун-та, 2002. – 128 с.

13. Дьяконов В.П. Mathematica 5/6/7. Полное руководство. – М.: ДМК Пресс, 2010. – 624 с.



Прытков Сергей Владимирович, кандидат техн. наук. Окончил в 2010 г. Мордовский государственный университет им. Н.П. Огарёва. Доцент кафедры светотехники НИУ «МГУ им.

Н.П. Огарёва». Область научных интересов: светотехнические расчёты



Сыромясов Алексей Олегович, кандидат физ.-мат. наук, доцент. Окончил в 2004 г. Мордовский государственный университет им. Н.П. Огарёва. Доцент кафедры прикладной математики, дифферен-

циальных уравнений и теоретической механики ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский «Мордовский государственный университет им. Н.П. Огарёва». Область научных интересов: математические и компьютерные модели физических и технических процессов

Текущее состояние освещения в Непале¹

Д. БИСТА^{1,5}, А. ШРЕСТА¹, Ж. ЦИССИС², П. БХУСАЛ³, Ф.В. ТОПАЛИС⁴,
Б. ЧХЕТРИ¹

¹ Университет Катманду, Дхуликхел, Непал

² Университет Поля Сабатье, Тулуза, Франция

³ Университет Аалто, Эспо, Финляндия

⁴ Афинский национальный технический университет, Афины, Греция

⁵ E-mail: diwakarbista@ku.edu.np

Аннотация

Освещение – это осмысленное использования источников света для обеспечения видимости и выполнения конкретных задач в тёмное время суток. В этих целях используются самые разные источники света и методы. При этом в результате технического прогресса традиционные методы освещения постепенно вытесняются эффективными осветительными установками, имеющими определённое назначение и области применения. В данной работе применительно к Непалу описаны текущее состояние осветительной техники, её применение, связанные с освещением проблемы, политика в области освещения и её последствия. Здесь же представлены некоторые статистические данные, полученные в результате рассмотрения 250-ти случаев, включающих в себя 5 разных целевых групп. В результате проведённого исследования было установлено, что население и правительство смещаются от традиционных методов освещения в сторону более эффективных и «чистых» методов. Эта работа по внедрению эффективного освещения полезна для разных областей человеческой деятельности, таких как образование, здравоохранение, безопасность, экономика и т.д., обеспечивая при этом улучшение условий жизни людей.

Ключевые слова: осветительная установка, проектирование освещения, связанные с освещением проблемы.

1. Введение

Свет имеет огромное значение для всех живых существ, так как, начиная с пищевой цепочки, он способствует получению всего того, что нужно для жизни, в том числе, пищи, здоро-

вой атмосферы и т.д. Кроме того, многие живые существа нуждаются в свете для того, чтобы видеть и выполнять каждодневную работу [1]. Другими словами, свет является средством общения членов группы и поэтому необходим для выживания [1]. С древнейших времён, когда люди жили в пещерах и после наступления темноты использовали в качестве источника света огонь, значимость света возрастала день ото дня по мере развития человечества. Свет и освещение, являющиеся одними из привычных удобств, оказывают существенное влияние на жизнь человека. Появление электрического освещения значительно облегчило обеспечение требуемого освещения и привело к возникновению многочисленных областей его применения [2]. В настоящее время освещение стало неотъемлемой частью образа жизни людей. Внутреннее освещение способствует выполнению привычных работ и улучшает эффективность людей в ночное время. Однако в данном контексте оно рассматривается применительно к особым вопросам освещения комнат, рабочих мест и т.д., обеспечивающим возможность создания идеальной рабочей среды [3]. Подобно свежей пище, воздуху и другим необходимым вещам, хорошее освещение способствует улучшению здоровья, мобилизации и повышению эффективности деятельности людей [2].

В данном исследовании применительно к Непалу описаны текущее состояние осветительной техники, её применение, проблемы и т.д. При этом основное внимание уделяется текущему использованию светотехники в различных секторах экономики Непала и рассматривается влияние освещения на повседневную жизнь населения.

2. Обзор осветительной техники и областей её применения

Как и во всём остальном мире, освещение в Непале начали применять ещё в древнее время, когда люди в качестве источника света использовали огонь. Позже люди использовали топливные источники света. Эти лампы имели корпуса в виде металлических бутылок и заправлялись животным жиром или растительным маслом. В настоящее время в сельских районах Непала используются модифицированные варианты этих ламп, состоящие из металлических или стеклянных банок и работающие на нефтепродуктах, таких как керосин или дизельное топливо, на биотопливе и т.д. Ещё одним горючим источником света являются свечи. На рис. 1 приведены примеры традиционных ламп, используемых в глубинных районах Непала. Согласно данным Центрального статистического бюро Непала, в 2011 г. электрические источники света использовались в 67,26 % домашних хозяйств (94,11 % в городах и 60,84 % в сельской местности), тогда как в 18,28 % домашних хозяйств (4,04 % в городах и 21,68 % в сельской местности) для освещения использовали керосин. В городах другие источники света составляли пренебрежимо малую часть, однако в сельской местности биогаз использовался в 0,26 % домашних хозяйств, а 9,16 и 7,41 % из них использовали, соответственно, ра-



Рис. 1. Люди, использующие топливное освещение при обучении (слева) и приготовлении пищи (справа) [5, 6]

¹ Перевод с англ. Е.И. Розовского

ботающие на солнечной энергии или иные источники света [4].

В современном мире люди пользуются разными осветительными приборами, выбираемыми с точки зрения обеспечиваемого ими комфорта. Тенденции в части изменения осветительной техники можно увидеть на рис. 2. В 2001 г. основным источником света являлся керосин, тогда как в 2011 г. освещение стало по большей части электрическим. В прошедшее десятилетие в городах, где наличествовало электроснабжение, очень популярными были лампы накаливания. Однако в настоящее время их можно найти только в некоторых отдалённых местах, где отсутствует нужна информация, а также в некоторых гостиницах и музеях, использующих лампы накаливания по причине их высокой цветопередачи и вырабатываемого ими тепла. Благодаря своей эффективности, в Непале популярны люминесцентные лампы, которые можно встретить и в коммерческих зданиях. В настоящее время во внутреннем и наружном освещении используются преимущественно компактные люминесцентные лампы (КЛЛ) и светодиоды (СД), тогда как в области освещения заливающим светом очень популярны галогенные лампы накаливания. Со временем на рынке появились имеющие разную форму и цветовые характеристики осветительные приборы, предназначенные для специальных областей применения. Общий обзор различных источников энергии и источников света, которые используются в Непале, представлен на рис. 3. Некоторые характерные для Непала важные области применения освещения описаны ниже.

2.1. Внутреннее освещение

Освещение – это осмысленное использование света для обеспечения видимости и выполнения конкретных задач в тёмное время суток. Основное назначение освещения – способствование деятельности, осуществляемой в помещениях, таких как жилые дома, офисы, производственные помещения, подземные парковки, магазины, торговые центры, гостиницы, рестораны, музеи и т.д., и главными задачами при этом являются обеспечение желательного освещения и улучшение привлекательности пространства и объектов. Освещению присущи различные огра-

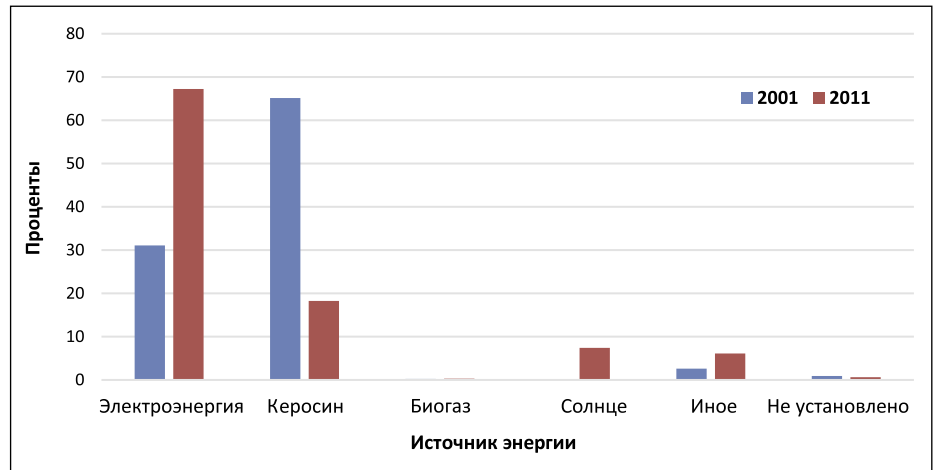


Рис. 2. Количество домашних хозяйств, использовавших источники света разных типов в 2001 и 2011 гг. [4]

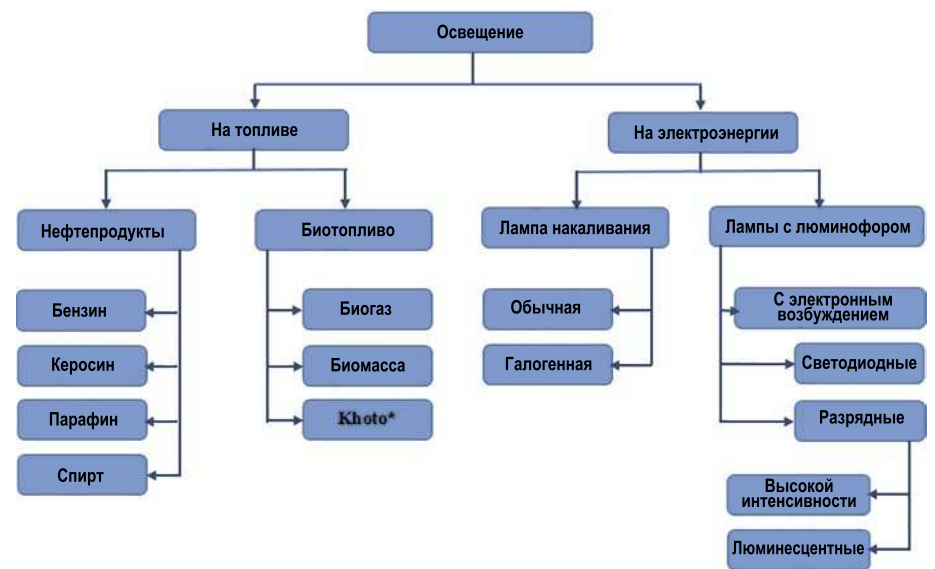


Рис. 3. Источники энергии и источники света, используемые в Непале (*Khoto – местное наименование скипидара, получаемого из сосновой живицы)

ничения и цели, которые обусловлены областью его применения, и оно может рассматриваться как важный фактор жизнедеятельности людей. В быту освещение служит для обеспечения возможности нормальной жизнедеятельности в ночное время, а в общем случае организация освещения и его разновидности могут меняться в зависимости от конкретных функциональных требований, так как на промышленных предприятиях, в магазинах и гостиницах освещение имеет свои особенности, которые определяются предъявляемыми у нему требованиями. От назначения зависят такие характеристики, как уровень освещённости, сила света, диффузность и способы освещения. На рис. 4 показаны освещение гостиницы, которое призвано обеспечить привлекательность

интерьера и требуемый уровень освещённости, и осветительная установка (ОУ), которая используется в музее для подсветки старинных изделий.

2.2. Освещение улиц и дорог

Последнее десятилетие характеризовалось расцветом освещения улиц и дорог, обеспечение которого является в Непале одним из основных градостроительных требований. В прошлом, большинство улиц и дорог освещались лампами накаливания общего назначения, которые впоследствии были заменены на люминесцентные лампы. В результате технического прогресса на смену используемому ранее освещению пришли основанные на использовании солнечной энергии автономные фотоэлектрические



Рис. 4. Освещение гостиницы/ресторана (слева) и подсветка старинных изделий в музее (справа)



Рис. 5. Освещение объектов культурного наследия Непала

(ФЭ) установки уличного освещения, включающие в себя белые СД. Эти ОУ должны быть прочными и выдерживать воздействие суровых условий окружающей среды. ФЭ ОУ не должны портить внешний вид существующих городов или планировку улиц – наоборот, они должны улучшать красоту существующих дорог. Основная задача освещения улиц и дорог состоит в том, чтобы обеспечить более яркое освещение в ночное время и улучшить уличные и дорожные условия, а также свести к минимуму количество случаев сексуальной агрессии, краж, несчастных случаев и т.д. Кроме того, оно способствует увеличению продолжительности периода активной деятельности людей, что положительно влияет на национальную экономику.

2.3. Освещение объектов культурного наследия

В настоящее время современные ОУ используются для демонстрации культурного и исторического наследия Непала, выделяя их и подчёрки-

вая их значимость (рис. 5). Для этого были разработаны разнообразные концепции освещения и соответствующие материалы. Одной из главных составляющих экономики Непала является туризм. Непалу присуще большое разнообразие культурных и природных достопримечательностей, которые привлекают туристов со всего мира. Помимо международного туризма, большой вклад в экономику вносит и внутренний туризм. Основными достопримечательностями Непала являются красивые природные объекты, разнообразные формы жизни, экстремальный туризм, горный и высокогорный туризм и альпинизм, а также разбросанные по стране объекты культурного наследия. Главные города Непала очень богаты объектами культурного наследия, которые привлекают туристов со всего мира. К сожалению, большинство достопримечательностей и мест пребывания туристов освещены плохо. В настоящее время объекты культурного наследия невозможно осматривать в ночное время из-за отсутствия освещения. Даже важные и популярные объекты либо вообще не ос-

вещены, либо освещены неправильно. Это уменьшает красоту культурного наследия и укорачивает время пребывания туристов. На рис. 5 показаны некоторые плохо спроектированные системы освещения объектов культурного наследия в непальских городах Бхактапур и Катманду. В последнее время заинтересованные лица работают над освещением ряда важных объектов культурного наследия (храм Трипура Сандари, площади Дурбар в Патане и Бхактапуре) для увеличения их привлекательности в тёмное время суток и ночного потока туристов, тем самым способствуя возрастанию деловой активности в этих местах.

2.4. Системы освещения автомобилей

Система освещения автомобиля включает в себя огни, установленные впереди (передние фары) и сзади (задние фонари) автомобиля и предназначенные для обеспечения требуемого освещения при движении в ночное время. Кроме того, в автомобиле имеется ряд специальных световых приборов, предназначенных для выполнения конкретных задач, таких как отображение различных параметров, освещение внутреннего пространства автомобиля, украшение и т.д. В большинстве современных автомобилей для освещения используются СД. В непальских автомобилях используются передние фары двух основных типов: белые и жёлтые (как правило, с галогенными лампами накаливания, ксеноновыми лампами и/или СД). Белые фары предназначены для обычных условий, тогда как жёлтые – для тумана. В задних фонарях используются красные и белые лампы: красные – для обозначения торможения и белые (для обозначения торможения) и белые (для освещения при движении задним ходом). СД в настоящее время используются для выполнения второстепенных задач, таких как освещение приборной доски автомобиля, в указателях поворота и габаритных огнях автомобилей, однако с появлением мощных СД их уже используют и в передних фарах автомобилей.

2.5. Иное

Помимо затрат на цифровую технику, во многих областях экономики

Типы ФЭ установок уличного освещения, используемые в Непале [11]

Тип	Мощность лампы, Вт	Пиковая мощность ФЭ модуля, не менее, Вт	Ёмкость свинцового аккумулятора, не менее, А·ч	Ёмкость литиевого аккумулятора, не менее, А·ч	Зарядный ток, не менее, А	Высота опоры, м	Полоса землеотвода, м
1	10	50	40	30	5	7	< 4
2	20	100	60	45	10	7	4–6
3	30	150	80	60	12	7	6–10
4	40	200	100	75	15	8/9	10–14
5	60	300	150	115	25	8/9	14–20
6	80	400	200	150	30	10	20–30
7	100	500	250	180	40	10	> 30

возросли затраты и на развитие традиционных методов. Сегодня цифровая реклама может служить одним из примеров применения освещения. Большинство участков в больших городах и на магистралях содержат рекламу. Помимо этого, с увеличением транспортного потока в большинстве оживлённых центров стали использовать автоматические светофоры, на фасадах учреждений устанавливают цифровые информационные панели и т.д. Это основные области применения освещения в Непале. Есть и другие области применения, такие как освещение для обеспечения машинного зрения, освещение для проведения осмотров в медицине и стоматологии, освещение спортивных залов и стадионов, светотерапия, навигационные огни, переносные фонари, сигнализация на аэродромах и т.д. Области применения будут, несомненно, расширяться, так как источники света в настоящее время используются повсюду и стали одной из основных жизненных потребностей людей.

3. Политика и стимулирование

В Непале нет никакой чётко сформулированной политики в области непосредственно освещения, хотя и имеется ряд стимулирующих программ в связанной с освещением области «чистых» источников энергии. Автономная ФЭ ОУ представляет собой установку наружного освещения, используемую для освещения улицы или открытого пространства. Используемые СД ФЭ ОУ получили широкое распространение. Центр по продвижению альтернативных источников энергии (АЕРС) в сотрудничестве с разными муниципалитетами осу-

ществляет монтаж светодиодных ФЭ ОУ, преследуя при этом определённую цель. АЕРС субсидирует использование возобновляемых источников энергии для стимулирования социально-экономического развития населённых пунктов посредством использования природных ресурсов наиболее современными методами. Ожидается, что АЕРС возьмёт на себя оплату 40 % от полной стоимости работающих на солнечной энергии ФЭ ОУ, которые должны быть смонтированы в крупных и средних населённых пунктах, тогда как 30 % стоимости будет покрываться бенефициарами, а ещё 30 % – за счёт кредитов [7]. Сельские муниципалитеты будут субсидировать 70 % стоимости проектов, причём 60 % этого финансирования приходится на АЕРС [7, 8]. Что касается данных, предоставленных АЕРС, то при участии АЕРС в 2016/2017, 2017/2018 и 2018/2019 финансовых годах в разных населённых пунктах страны были реализованы, соответственно, 1622, 1357 и 1060 установок уличного освещения. Типы и технические характеристики ФЭ ОУ приведены в табл. 1, а технические характеристики ФЭ модуля приведены в табл. 2. В свою очередь, Департамент электроснабжения Непала (NEA) установил в различных местах долины Катманду 1600 уличных светильников с лампами мощностью 30, 40 и 60 Вт. Внедряются связанные бизнес и организацию освещения новые концепции, в рамках которых частные компании являются собственниками установок уличного освещения, получая доход от рекламных щитов. За несколько последних лет в рамках такого ориентированного на бизнес подхода были установлены больше чем 2000 светильников с лам-

пами мощностью 30 и 40 Вт. Кроме того, разные неправительственные организации, в том числе и международные, предоставляют сельским поселениям, в которых отсутствует централизованное энергоснабжение, маломощные ФЭ системы, светильники и фонари.

NEA запустил проект по внедрению энергоэффективного освещения, призванный уменьшить использование ламп накаливания. В 2014 г. в рамках этого проекта при поддержке Азиатского банка развития в разных частях страны были распределены 750000 энергоэффективных КЛЛ [9]. Кроме того, NEA реализовала проведение информационно-просветительской кампании «Светлый Непал, преуспевающий Непал» в целях регулирования энергопотребления посредством перехода потребителей от использования ламп накаливания на СД, в результате чего пиковое потребление энергии будет ограничено определённым уровнем [10].

Что касается официальных данных, предоставленных Станцией по испытанию изделий, работающих от возобновляемых источников энергии (RETS), то за последние 5 лет на этой станции были испытаны 5218 образцов белых СД разной мощности, и более чем 2568222 лампы были допущены в продажу. За эти 5 лет наибольшее количество белых СД было импортировано в 2014 г. Контролируемые технические характеристики СД источников света приведены в табл. 3. Непальская научно-техническая академия работает над организацией в Непале отделения испытаний и стандартизации, с тем чтобы можно было осуществлять проверку и поддержание качества импортированных из дру-

Таблица 2

Технические характеристики ФЭ модуля [11]

Характеристика	Спецификация
Установленная мощность	Установленная мощность должна соответствовать типу ФЭ уличного освещения
Тип модуля	Моно- или поликристаллический или тонкоплёночный
Рабочее напряжение в зависимости от выходной мощности	Кристаллические модули: 34 В* для каждого 24-вольтового модуля и 17 В* для каждого 12-вольтового модуля Тонкоплёночные модули: по меньшей мере на 40 % больше питающего напряжения освещения
Минимальный КПД модуля	Кристаллические модули: 14 % Тонкоплёночные модули: 10 %
Монтажная коробка	IP65 или выше
Угол и направление наклона	Строго на юг для местной широты
Крепёжные элементы	Нержавеющая сталь или оцинкованные горячим способом
Стандарты на конструкцию	IEC61215, IEC61646
Стандарт безопасности	IEC61730
Сертификация	RETS

* Максимальное значение напряжения

гих стран или изготовленных в Непале изделий.

Кроме того, информационные аудио и видео материалы в области энергоэффективного освещения распространяются посредством радио, телевидения и газет. В больших гостиницах и коммерческих зданиях, а также в государственных учреждениях, используются КЛЛ и датчики присутствия, способствующие выполнению программ в области энергоэффективного освещения. Для ускорения внедрения энергоэффективного освещения организуется обучение применению этого освещения и курсы лекций в университетах.

4. Социально-экономическое воздействие ОУ

Более чем 9,3 % населения Непала (22,513 % сельского населения и 3,12 % городского населения) не имеют доступа к электроэнергии, и даже те, кто подключён к национальной системе энергоснабжения, не могут получить надёжное и достаточное энергоснабжение [12]. Одной из основных причин подобной ситуации является горный характер Непала, в котором более 60 % населения проживают в гористой местности, где трудно обеспечить снабжение элек-

троэнергией посредством национальной системы энергоснабжения [9, 13]. Эти люди вынуждены использовать топливные осветительные приборы, представляющие опасность для женщин и детей. Эти источники энергии не подходят для людей как по технико-экономическим, так и по экологическим причинам. Новейшие технологии следует использовать для уменьшения стоимости и вредных выбросов ОУ, что окажет сильное влияние как на целевую группу, так и на страны – производители этого оборудования. За последние годы были реализованы различные технические средства и пилотные проекты, призванные обеспечить доступ целевых групп к «чистой» энергии в целях их непрерывного развития в части здравоохранения, образования, безопасности, экономической деятельности и т.д. Солнечные светильники, маломощные ФЭ установки, ФЭ уличные светильники, системы распределения энергии в населённых пунктах и питающиеся от сети энергоснабжения ОУ – это лишь некоторые примеры использования возможных систем энергоснабжения. Считается, что подобные технологии помогают людям не только осветить свои жилища и окружающую территорию после наступления сумерек, но и увеличить эффективную продолжитель-

ность рабочего дня. Исходя из этого предположения, основным направлением деятельности по нормализации существующего положения является проведение практических исследований и использование импортных изделий, что обеспечивает быстрое, но не перспективное, решение проблемы. При этом, подобная энергетическая система не представляется технико-экономически обоснованной в среднесрочной перспективе. К тому же, в городской местности ОУ оказывают большое влияние на обслуживание, безопасность, экономику и продвижение объектов культурного наследия и связанных с ними бизнес-проектов. Подробное рассмотрение влияния ОУ на социально-экономическое развитие населения проведено ниже.

4.1. Последствия использования ОУ в сельской местности Непала

Значимая часть сельского населения Непала использует для освещения традиционные источники энергии, такие как ископаемое топливо, биомасса и т.д., которые не являются ни «чистыми», ни неисчерпаемыми, ни технико-экономически приемлемыми, а также представляют опасность для женщин и детей [14]. Благодаря этим ненадёжным источникам энергии, большинство развивающихся стран, включая Непал, сталкивается с большими проблемами в областях здравоохранения, образования, безопасности и экономической деятельности. Чтобы увеличить продолжительность своей дневной активности, люди вынуждены использовать традиционные топливные источники энергии [15]. В настоящее время люди стараются обеспечить освещение, необходимое для осуществления их повседневной домашней деятельности, такой как приготовление пищи и другие домашние работы, и возможности обучения детей, при помощи небольших керосиновых ламп, работающих на солнечной энергии светильников или, при наличии централизованного энергоснабжения, других источников света [15]. На рис. 1 показана ситуация, когда люди зависят от топливных источников света. Помимо проблем с выполнением работы и созданием комфортной зоны для людей, относящихся к определённой возрастной группе (для обучения у детей, для пригото-

Технические характеристики источников света для уличного освещения [11]

Характеристика	Спецификация
Тип	СД
СД источник света	Световой поток должен соответствовать типу ФЭ уличного светильника
Световая отдача	≥ 100 лм/Вт
СД освещение	Уличный светильник должен обеспечивать не менее чем 0,5 лк/Вт при высоте подвеса 9 м. Освещение должно быть равномерным, без тёмной «сыпи» на земле
Угол излучения	$\geq 2 \cdot 50^\circ$
Индекс цветопередачи	Индексы цветопередачи отдельных белых СД должны быть не меньше чем 60, а цветовая температура должна лежать в пределах от 5000 до 6000 К
Номинальный световой поток лампы	Световой поток должен соответствовать типу ФЭ уличного светильника
Управление	Автоматическое переключение из сумеречного режима работы на ночной. Также включает в себя двухступенчатую регулировку мощности. На первой стадии система должна работать в режиме 100 % нагрузки в течение 6-ти часов, а на второй стадии она должна работать в режиме 50 % нагрузки в течение следующих 6-ти часов
Устройство управления	Устройство управления должно включать в себя контроллер заряда и иметь КПД не ниже чем 85 %
Защита	Лампа должна быть защищена от перемены полярности
Сертификация	Наличие сертификата на <i>IP65</i> или выше и сертификата <i>RETS</i>
Ожидаемый срок службы	Минимум 50000 ч

ления пищи у взрослых и для другой деятельности у всех), использование для освещения традиционных топливных источников света влечёт за собой различные последствия для здоровья людей, такие как пневмония, инсульт, ишемическая болезнь сердца, хроническая обструктивная болезнь лёгких и рак лёгких [16]. Большинство традиционных ламп приводят к образованию частиц диаметром 2,5 мкм и токсичных примесей в окружающей среде, концентрации которых превышают максимально допустимые уровни, установленные Всемирной организацией здравоохранения. Сообщалось о представляющих опасность испарениях как фитилей, так и некоторых используемых для освещения видов топлива, изготавливаемых с использованием свинца, а также об оболочках светильников, содержащих радиоактивный торий [17]. В [18] было установлено, что вероятность того, что использующие керосин непальские женщины заболеют туберкулёзом, в шесть раз выше, чем у женщин, использующих электрическое освещение. Среди всех групп, женщины и дети подвергаются большей опасности, так как они большую часть своего времени находятся в помещениях [17]. Кроме того, использование традиционного освещения приводит к несчастным случаям, например, к возгораниям, обуслов-

ленным работающими не на электрической энергии бытовыми приборами. Сообщалось, что в сельской местности Непала ожоги являются вторыми по распространённости (5 % от общего количества) телесными повреждениями, причём 20 % от равного 237 общего количества ожогов связано с возгораниями, вызванными традиционными лампами [19, 20]. Эти возгорания причиняют как физический, так и финансовый ущерб населению Непала, так как вредят здоровью, домам, промышленным предприятиям, фермам и т.д. Сексуальная агрессия в ночное время при отсутствии должного освещения, кражи, нападение диких животных и укусы змей – вот некоторые из основных проблем, присущих сельской местности [13].

Правительство Непала при помощи различных занимающихся развитием исполнительных органов работает над предоставлением доступа к электроэнергии, с тем чтобы избавить людей от проблем, связанных с топливным освещением. Считается, что разрабатываемая стратегия в области освещения поможет улучшить в сельских районах ситуацию в областях здравоохранения, образования, безопасности и экономической деятельности [21]. В [18] было показано, что связанные со здоровьем проблемы могут быть в значительной степени ре-

шены в результате замены топливного освещения на питающиеся от возобновляемых источников энергии «чистые» ОУ. В эмпирическом исследовании [22] было установлено, что проблемы со здоровьем и безопасностью, наблюдавшиеся в 500 домашних хозяйствах в связи с использованием топливного освещения, уменьшились после замены этого освещения на ФЭ системы. Связанные со здоровьем и травматизмом последствия использования керосиновых ламп были полностью устранены после их замены. Кроме того, внедрение ОУ, питаемых возобновляемыми источниками энергии, способствует улучшению уровня образования в сельской местности, обеспечивая комфортные условия и возможность использования современных методов преподавания, основанных на интернете, компьютерах, проекторах, ксерокопировании и т.д. [18]. С другой стороны, внедрение новых систем освещения способствует оживлению экономики сельских населённых пунктов, увеличивая продолжительность рабочего дня и предоставляя энергию, необходимую для работы местных предприятий [23]. К тому же, наличие должного освещения приводит к существенному уменьшению количества случаев сексуальной агрессии, краж и нападения диких животных.

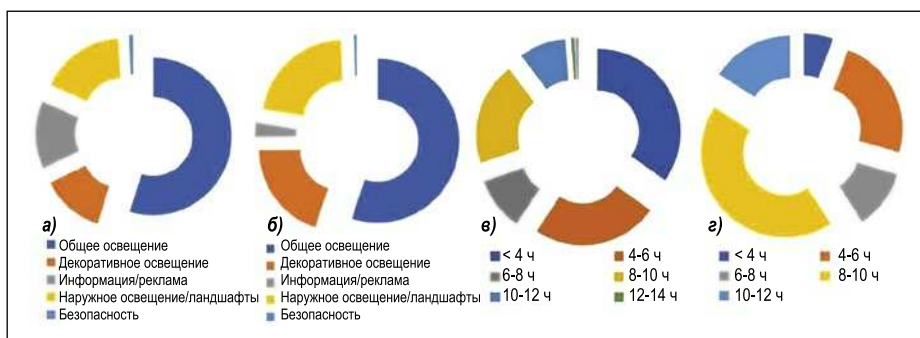


Рис. 6. Использование искусственного освещения в рабочих зонах (а) и жилых помещениях (б). Продолжительность работы искусственного освещения в рабочих зонах (в) и жилых помещениях (г)

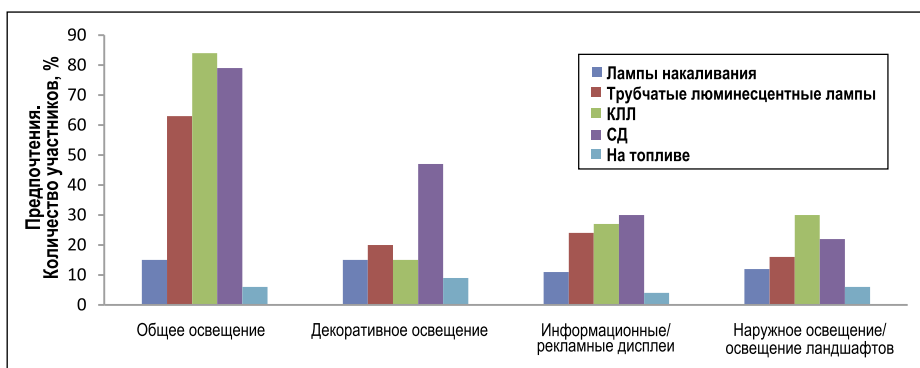


Рис. 7. Типы светильников, используемых в разных целях

4.2. Последствия использования ОУ в городах Непала

Хотя электроэнергия и недоступна только для 3,1 % городского населения Непала, освещение играет важную роль в повседневной жизни всех горожан [12]. В принципе, с освещением связаны и образование, и безопасность, и культура, и экономическая деятельность. Правильное освещение улиц, площадей и таких объектов, как рестораны, магазины, гостиницы, памятники и т.д., несомненно, понравится туристам и внесёт значительный вклад в туристическую деятельность. Полный вклад путешествий и туризма в валовой внутренний продукт Непала в 2017 г. составил 7,8 %, и на них приходится создание 1,02 млн рабочих мест [24]. Привлекательное освещение ресторанов приводит к увеличению желания пообедать в них, а хорошее освещение памятников и объектов культурного наследия способствует возрастанию их привлекательности и числа посетителей. Кроме того, хорошее освещение магазинов означает, что покупатели смогут лучше видеть выставленные товары и с большей вероятностью приобретут их, и т.д. Оно также позволяет увели-

чить активность людей в ночное время, увеличивая тем самым производительность их труда и экономический эффект от их деятельности. Хорошее освещение улиц, проходов и площадей означает возрастание безопасности и стремления провести там больше времени и способствует снижению вероятности совершения преступлений. Сексуальная агрессия представляет собой большую опасность для женщин, и она, к сожалению, широко распространена во всех городах земного шара [25]. На рис. 4 и 5 продемонстрировано положительное влияние освещения на образ жизни населения в городах Непала.

5. Текущее состояние освещения в Непале

Согласно [26], в 2018 г. 43,50 % потребления энергии приходилось на быт, 3,11 % – на некоммерческие нужды, 7,38 % – на коммерческие нужды, 37,53 % – на промышленность, 8,43 % – на другие отрасли экономики и 0,05 % было экспортировано в Индию. Эти данные говорят о том, что в Непале большая часть электроэнергии потребляется в жилых домах. Согласно опубликованным *NEA*

данным о нагрузках, пиковый спрос на электроэнергию приходится в Непале на вечерние часы, и основной вклад в него вносит освещение [26]. Проведённое исследование показало, что примерно 60 % используемой в Катманду энергии может быть сэкономлено при переходе на СД лампы [27]. Поэтому энергоэффективное освещение считается предпочтительным для поддержания баланса между спросом и предложением. Команда исследователей, в которую входили и авторы этой статьи, изучила проблему необходимости светотехнического просвещения, разработав вопросник для пяти разных групп: работодатели, выпускники университетов, студенты, преподаватели и потребители [28]. В исследовании приняли участие 250 человек (20 работодателей, 30 выпускников университетов, 98 студентов, 57 преподавателей и 45 потребителей). В результате было установлено, что все участники опроса использовали искусственные источники света на работе или дома как для целей общего освещения, так и в других целях, зависящих от их потребностей. Количественные данные, характеризующие использование искусственного освещения в разных целях на работе и дома, приведены на рис. 6а и 6б. При этом на общее освещение в обоих случаях приходится более чем 50 % использования освещения, тогда как на обеспечение безопасности и информацию и рекламу приходится гораздо меньший процент. А приведённые на рис. 6в и 6г данные о продолжительности использования искусственного освещения на работе и дома говорят о том, что большинство участников опроса дома используют искусственное освещение на протяжении более чем 8 часов в день, тогда как на работе они пользуются общим освещением на протяжении менее чем 6 часов в день.

В настоящее время на непальском рынке присутствуют светильники разных типов, и потребители имеют разные предпочтения в части их стоимости, назначения и эффективности. КЛЛ распространены в Непале больше, чем лампы накаливания, трубчатые люминесцентные лампы, СД лампы и другие источники света. На рис. 7 приведены типы светильников, которые использовались участниками опроса в тех или иных целях. Для общего освещения во всём Не-

пале в равной степени используются СД лампы, КЛЛ и трубчатые люминесцентные лампы. В декоративных целях и в дисплеях СД используются в настоящее время чаще, чем другие лампы, а для наружного освещения и освещения ландшафтов предпочитают использовать КЛЛ и СД лампы. Основной преградой на пути принятия энергоэффективного освещения является недостаток знаний и осознания важности такого освещения, нехватка квалифицированной рабочей силы, высокая стоимость и низкое качество представленных на рынке изделий. Как показано на рис. 8а, участники опроса утверждали, что недостаток знаний и высокая стоимость энергоэффективных изделий являются главными препятствиями на пути внедрения энергоэффективного освещения. В ходе опроса было установлено, что большинство участников знакомо с энергоэффективными изделиями, причём 72 % выпускников и 97 % преподавателей утверждали, что они знакомы с организацией энергоэффективного освещения. Из рис. 8б следует, что 63 % участников опроса из всех имеющихся на рынке вариантов предпочитают СД лампы, тогда как на рис. 8в отражены причины предпочтительности тех или иных светильников для разных участников. При этом 25 % участников предпочитают высокоэффективные светильники, 28 % предпочитают светильники с большими сроками службы, а 21 % – наиболее дешёвые светильники.

6. Заключение

Потребность в электроэнергии возрастает день ото дня, и в большинстве развивающихся стран её не удаётся удовлетворить из-за больших капитальных затрат на выработку и передачу электроэнергии. Освещение является одной из главных нагрузок в жилом секторе, и в большинстве развивающихся стран, таких как Непал, именно на него приходится основная часть пикового спроса на электроэнергию в вечернее время. Использование энергоэффективного освещения поможет уменьшить потребность в электроэнергии и, тем самым, будет способствовать уменьшению разрыва между спросом и предложением в части электроэнергии. Для освещения в большинстве жилых

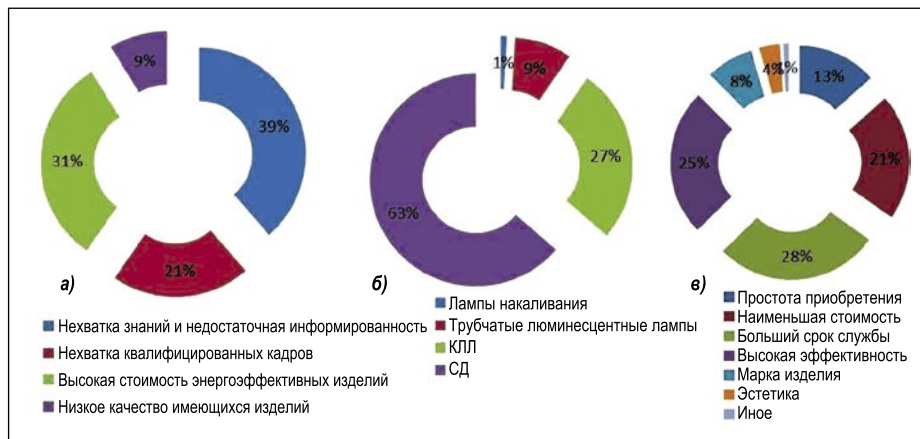


Рис. 8. Проблемы, связанные с внедрением энергоэффективного освещения (а), предпочитаемые светильники (б) и причины предпочтительности светильников (в)

и коммерческих зданий используются лампы накаливания или трубчатые люминесцентные лампы, которые гораздо менее эффективны, чем имеющиеся в настоящее время КЛЛ и СД. Несмотря на некоторые предпринятые правительством меры, использование неэффективных ламп до сих пор не прекратилось. Основными препятствиями на пути внедрения энергоэффективного освещения являются качество имеющихся на рынке СД ламп, высокая стоимость энергоэффективных изделий и недостаточная информированность потребителей.

Энергоэффективное освещение связано с использованием светильников, потребляющих меньше энергии и более эффективных по сравнению с другими имеющимися на рынке светильниками. Эти светильники обеспечивают качественное освещение при меньшем потреблении энергии. Поэтому и население, и правительство смещаются от традиционных способов освещения в сторону эффективных и «чистых» технологий. Внедрение эффективных и «чистых» способов освещения поможет людям улучшить свой жизненный уровень.

Это исследование финансировалось Электротехническим центром Университета Катманду в рамках фондов, предоставленных посольством Норвегии в Непале, и проектом *ELNAB*, частичное финансирование которого осуществляется в рамках программы *Erasmus+* Евросоюза. Авторы хотели бы поблагодарить г-на Башанту Дхакала (*Bashanta Dhakal*) и г-на Мадана Оли (*Madan Oli*) из *RETS*, а также Чайтанью П. Чадхари (*Chaitanya P. Chaudhary*) из *AEPC* за помощь в сборе данных, требовав-

шихся для проведения этого исследования. Авторы также признательны Министерству финансов Непала, г-ну Рамешу Махарьяну (*Ramesh Maharjan*) и г-ну Кшитизу Кханалу (*Kshitiz Khanal*) за поддержку во время проведения этого исследования.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Why Is Light so Important to Us? Available: <https://www.reference.com/science/light-important-38b176ddab4c448c>
2. Vision 2020 The Lighting Technology Roadmap // In: A 20-year Industry Plan for Lighting Technology // U.S. Department of energy. For more information: United State 2018. Available: <https://www.nrel.gov/docs/fy00osti/27996.pdf>.
3. *Importance of Lighting* // ANJ.– 2018. Available: <https://anj.co.in/idea-at-anj/importance-of-lighting/>
4. National Population and Housing Census 2011 (National Report) // Central Bureau of Statistics, Government of Nepal, Kathmandu, Nepal, 2011. Available: <https://unstats.un.org/unsd/demographic-social/census/documents/Nepal/Nepal-Census-2011-Vol1.pdf>.
5. *Vagianos, A., Hahlen, D.* 50 Captivating Photos of Girls Going to School Around the World: Gender should not be a factor in education // December 30, 2016. Available: https://www.huffingtonpost.com/entry/50-captivating-photos-of-girls-going-to-school-around-the-world_us_56d61a7de4b0871f60ed1f3ce
6. Leaf-nosed bat // In: Encyclopædia Britannica, ed: Encyclopædia Britannica Online, 2009.
7. Urban Solar Energy System & Soft Loan Operation Manual // In: Urban Solar Energy System Subsidy and Loan Mobilization Directives-2072, Ministry of Science, Technology and Environment, Lalitpur, Nepal, 2016. Available: <https://www.aepc.gov.np/urbansolar/downloadfile/URBAN%20SOLAR%20ENERGY%20SYSTEM%20&%20SOFT%20>

LOAN%20OPERATIONAL%20MANUAL_1467103507.pdf.

8. Renewable Energy Subsidy Policy, 2073 BS (Unofficial translation) // Ministry of Population and Environment, Lalitpur, Nepal, 2016. Available: [https://www.aepc.gov.np/uploads/docs/2018-06-19_RE%20Subsidy%20Policy,%202073%20\(English\).pdf](https://www.aepc.gov.np/uploads/docs/2018-06-19_RE%20Subsidy%20Policy,%202073%20(English).pdf).

9. NEA Annual Report // Nepal Electricity Authority, Kathmandu, Nepal, 2017. Available: <file:///C:/Users/user/Downloads/87757284.pdf>.

10. Terms of Reference for Promotion of High Efficiency Light Emitting Diode (LED) Lamps // Ed. Kathmandu, Nepal: Nepal Electricity Authority, 2015.

11. Technical Guideline for Solar Street Light Project // In: Technical Specification, Alternative Energy Promotion Center, Lalitpur, Nepal, 2018. Available: https://www.aepc.gov.np/uploads/docs/2018-06-19_Technical%20Standard%20for%20Solar%20Street%20Light%20System,%202072.pdf.

12. Access to electricity (% of population) // SE4ALL. (2018). Available: <https://data.worldbank.org/indicator/EG.ELC.ACCTS.UR.ZS>

13. Raj Upreti, B., KC, S., Mallett, R., Babajanian, B. Livelihoods, basic services and social protection in Nepal // Nepal Center of Contemporary Research. Available: <https://www.odi.org/sites/odi.org.uk/files/odi-assets/publications-opinion-files/7784.pdf>.

14. Kobayashi, H., Zhang, H., Manandhar, P., Jude, A., Yokoyama, K. NEPAL ENERGY SECTOR ASSESSMENT, STRATEGY, AND ROAD MAP // Asian Development

Bank. Available: <https://www.adb.org/sites/default/files/publication/356466/nepal-energy-assessment-road-map.pdf>.

15. Shrestha, N. Enabling children to study after sunset // In: Nepal: Light for Hope. Sumar-Lakhani foundation: Fostering unique visions to tackle the world's toughest problems 2017. Available: <http://www.sumarlakhanifoundation.org/nepal-solar-lamps/>.

16. Household air pollution and health // WHO. – December 30, 2018. Available: <https://www.who.int/news-room/fact-sheets/detail/household-air-pollution-and-health>

17. Seftel, J. Profile: Irene Pepperberg & Alex // In: NOVA Science Video Podcast, N. d. G. Tyson, Ed., ed. Boston: WGBH, 2011.

18. Mills, E. Health impacts of fuel-based lighting // 3rd International Off-Grid Lighting Conference, Dakar, Senegal, 2012, pp. 13–15.

19. Liu, E., Khatri, B., Shakya, Y., Richard, B. A 3 year prospective audit of burns patients treated at the Western Regional Hospital of Nepal // Burns. – 1998. – Vol. 24, No. 2. – P. 129–133.

20. Mock, C et al., A WHO Plan for Burn Prevention and Care // Geneva, Switzerland. – 2018, Available: http://apps.who.int/iris/bitstream/handle/10665/97852/9789241596299_eng.pdf;jsessionid=E347ED36E3460C39E41BED35CB5A936?sequence=1.

21. Sapkota, A., Lu, Z., Yang, H., Wang, J. Role of renewable energy technologies in rural communities' adaptation to climate change in Nepal // Renewable Energy. – 2014. – Vol. 68. – P. 793–800.

22. Thatcher, S. An empirical Study into the benefits of relieving energy poverty in the developing world // 2pp. Retrieved from http://www.pfpi.org/pdf/empiricalStudy_energy_poverty.pdf [Accessed July 23, 2014], plus data files (personal communication, 2012).

23. Basnet, U. Renewable Energy Powers Rural Nepal Into the Future // December 30, 2014. Available: <http://www.worldbank.org/en/news/feature/2014/02/05/renewable-energy-powers-rural-nepal-into-the-future>

24. Turner, R. Travel & Tourism Economic Impact 2018: Nepal // In: Travel & Tourism Economic Impact 2018, World Travel & Tourism Council 2018. Available: <https://www.wttc.org/-/media/files/reports/economic-impact-research/countries-2018/nepal2018.pdf>.

25. EXPERT SURVEY: GIRLS' SAFETY IN CITIES ACROSS THE WORLD // Plan International 2018. Available: <https://plan-international.org/publications/expert-survey-girls-safety-cities#download-options>.

26. NEA Annual Report 2074/75 // In: NEA Annual Report, Nepal Electricity Authority, Kathmandu 2018. Available: http://www.nea.org.np/annual_report.

27. Timilsina, S.R., Shakya, S.R. The Status of Energy Efficient Bulbs and the Potential Energy Savings in the Kathmandu Valley // IOE Graduate Conference, Pulchowk, Lalitpur, 2013. Available: <http://conference.ioe.edu.np/ioegc2014/papers/IOE-CONF-2014-57.pdf>

28. National Need Assessment Report Nepal // Kathmandu University, Nepal Engineering College and Sagarmatha Engineering College. – 2017.



Дивакар Биста (Diwakar Bista), M. Sc.

Окончил Университет Катманду, Непал (2005 г.). Доцент и зав. кафедрой Университета Катманду. Область научных интересов: системы управления, внутрен-

нее и наружное СД освещение, фотоэлектрические системы освещения



Жорж Циссис (Georges Zisis), Ph.D.

Окончил Критский университет (1964 г.). Профессор Университета Поля Сабатье (Тулуза-3). Почётный профессор СПбГУ, руководитель группы «Свет и вещество». Область

научных интересов: физика газового разряда, метрологическое обеспечение СД освещения, стандартизация и проблемы качества источников света, качество жизни, здоровье и безопасность, освещение



Франгискос В. Топалис (Frangiskos V. Topalis), Ph.D.

Окончил Афинский национальный технический университет (1979 г.). Профессор Афинского национального технического университета. Область научных инте-

ресов: проектирование освещения, рациональное использование энергии в зданиях



Ашиш Шрестха (Ashish Shrestha), M. Sc.

Окончил Университет Покхары, Непал (2014). Лектор Университета Катманду, Непал. Область научных интересов: планирование и эксплуатация энергосистем, возобновляемая энергия, энергоустановки



Прамод Бхусал (Pramod Bhusal), D. Sc.

Окончил Университет Катманду, Непал (2000 г.). Научный сотрудник Университета Аалто, Финляндия



Бхупендра Бимал Чхетри (Bhupendra Bimal Chhetri), D. Eng.

Окончил Бангладешский инженерно-технический университет (1993 г.). Профессор Университета Катманду, Непал. Область научных интересов:

оптическая связь, обработка сигналов, освещение

85 лет Северную столицу освещает «Ленсвет»

«Ленсвет» был образован согласно постановлению Президиума Ленинградского Совета РК и КД №68 от 2 марта 1934 года, П. 275 «О реорганизации Отдела наружного освещения управления благоустройства в хозрасчётную контору под наименованием Трест наружного освещения «Ленсвет» (трест «Ленсвет»). 19 сентября 1934 года на заседании Президиума Ленсовета был утверждён устав треста, на который были возложены функции устройства и эксплуатации наружного освещения в Ленинграде и его пригородах. Эта дата – день рождения профессионального коллектива прославленного предприятия Санкт-Петербургского Государственного унитарного предприятия «Ленсвет» (СПб ГУП «Ленсвет»), который на протяжении своей 85-летней истории прошёл огромный, трудный рабочий путь, насыщенный новыми творческими исканиями, экспериментами по созданию качественного бесперебойного наружного освещения и архитектурно-художественной подсветки одного из красивейших городов мира.

Так в 2014 году по данным Росстата России (год 80-летия СПб ГУП «Ленсвет») рейтинг по доле освещения улиц в городах России возглавил Санкт-Петербург (100 %, у Москвы – для сравнения – доля освещения составила 96,18 %). В 2017 году Санкт-Петербург признали лучшим туристским городом Европы. В получении этой престижной премии немалая заслуга и «Ленсвета».

Хотелось бы также коротко коснуться и истории появления нынешнего официального названия предприятия. 20 лет тому назад – 28 мая 1999 года – Государственное электросетевое предприятие «Ленсвет» стало называться ГУП «Ленсвет», а уже 12 сентября 2000 года было снова переименовано по распоряжению КУГИ администрации Санкт-Петербурга в СПб ГУП «Ленсвет».

Краткая информация о ключевых направлениях и работах предприятия в различные периоды своей деятельности. На начало 1941 года в Ленинграде насчитывалось 30335 светильников наружного освещения общей мощностью 5600 кВт. Во время блокады города с 8 сентября 1941 года многие сотрудники ушли в Красную Армию. Оставшийся коллектив треста насчитывал 40 человек, в основном это были женщины. 17 ноября 1941 года город погрузился во тьму. 27 января 1944 года, когда город был освобождён от фашистской блокады, наружное освещение Ленинграда было разрушено на 80–85 %. Лишь благодаря титанической работе ленсветовцев к концу 1950 года количество светильников наружного освещения города превысило довоенный уровень.

Сегодня основное кредо освещения города – безопасность, комфорт, эстетика. Если

в 2003 году на эксплуатации у «Ленсвета» было 203 тыс. светильников, то уже в сентябре 2019 года их стало 350 тыс. штук. Наряду с увеличением световых точек для наружного освещения «Ленсвет» стремится к снижению средней мощности одного светильника. Это достигается увеличением доли светильников со светодиодами в общем количестве установленных светильников. Сегодня предприятие стремится к тому, чтобы уже в следующем году средняя мощность одного светильника составила 163 Вт.

С 1 января 2014 года работа наружного освещения города изменилась. Если до этого она работала по двум режимам – вечернему (включение 2/3 светильников) и ночному (включение 1/3 светильников), то сейчас система освещения работает в едином режиме. Работают 100 % светильников. Несколько причин для такого перехода: новые правила устройства электроустановок (ПУЭ) потребовали 50 % работы светильников в ночном режиме. Это требование практически было очень затратно и трудно выполнимо. Кроме того, в городе значительно вырос парк личных автомобилей горожан (более 1,35 млн, которые ездят и в ночное время, а освещение – важный фактор безопасности движения). Также для генерирующих устройств, особенно для атомных электростанций, нежелательна низкая нагрузка, которая имеет место в ночное время. Так что такой переход несколько улучшает их работу, давая в это время дополнительную электрическую нагрузку.

Важным фактором в работе предприятия является архитектурно-художественная подсветка. 10 июня 1964 года по инициативе архитектурно-планировочного управления и горисполкома города при «Ленсвете» была создана служба художественной подсветки. К этому времени на балансе и обслуживании предприятия находилось 22 объекта с общим количеством светильников – 710. В 2004 году уже было 155 объектов с 15054 светильниками, а в 2014 году – 405 объектов. В 2019 году таких объектов стало уже 490!

В настоящее время предприятие обслуживает 4655 объектов, которые освещают улицы, магистрали, кварталы, парки во всех административных районах города и задействованы для подсветки городских зданий, памятников, инженерных сооружений. В 1994–1995 годах светотехники из города Лиона, побратима Ленинграда, сделали городу подарок и при активном участии сотрудников ЭСП «Ленсвет» осуществили в короткие сроки высококачественную подсветку знаменитого музея мира – Государственного Эрмитажа. С одной стороны подсветка была выполнена прожекторами, встроенными в тротуар у подножия здания музея, с другой – маленькими прожекторами, за-

креплёнными на фасаде. Количество прожекторов и осветительных приборов было – 297, установленная мощность – 80 кВт.

Управление наружным освещением города сейчас производится из нового диспетчерского пункта, благодаря которому включение наружного освещения города происходит за 3–4 минуты. За это время подаётся электропитание на 1766 пунктов типа «Ленсвет», расположенных в различных местах города. С января 2019 года от этого диспетчерского пункта подключено 850 пунктов в пригородных районах. Общая потребляемая мощность на нужды наружного освещения и архитектурно-художественной подсветки составляет 59,5 МВт.

Особое место в работе предприятия занимает и информационно-исследовательская деятельность, стремление к совершенствованию и претворению на практике всего нового, более экономичного, рационального и полезного. Совместно с Санкт-Петербургским национальным исследовательским университетом информационных технологий, механики и оптики (Университетом ИТМО) СПб ГУП «Ленсвет» осуществляет инновационный городской исследовательский проект по развитию освещения города на период 2018–2030 годов с перспективой до 2050 года. Это первый в России и мире проект такого масштаба.

В течение многих лет «Ленсвет» выпускает корпоративную газету – интересную, познавательную, освещающую актуальные вопросы деятельности предприятия и города. Несколько слов об издательской деятельности предприятия: в 2009 году к 75-летию «Ленсвета» вышла книга «История освещения Санкт-Петербурга» – уникальная по содержанию и превосходная по оформлению, а также открыты с изображениями различных фонарей. В 2014 году к 80-летию предприятия вышло единственное в своём роде издание «Летопись Ленсвета». В ней содержится богатый материал печатного текста, многочисленные иллюстрации, архивные и современные фотографии и документы.

В заключении лишь краткого обзора деятельности прославленного предприятия его концепцию можно выразить словами директора «Ленсвета» Сергея Викторовича Мителева: «Сегодня электрическим светом формируется новая световая культура, визуальная композиция нашего с Вами славного города на Неве».

Поэтому пожелаем профессиональному коллективу Ленсветовцев, в их юбилейный день рождения, с таким же мастерством, любовью, кипучей энергией и дальше продолжать наш чудный город освещать, ибо в темноте любой шедевр архитектуры без света будет не видать, и он не сможет людям радость и настроение доставлять и поднимать!

**Е.А. Лесман, инж.-энергетик,
корреспондент, журнала «Светотехника»
в Санкт-Петербурге**

Московский Дом Книги

«Не нужно доказывать, что образование – самое великое благо для человека. Без образования люди и грубы, и бедны, и несчастны.»
Николай Чернышевский

«Дом, в котором нет книг, подобен телу, лишённому души.»
Цицерон

Книга – тот мощный и уникальный интеллектуальный инструмент, который объединяет поколения, соединяет достижения и открытия прошлого и будущее, делает возможным диалог между увлечёнными людьми, живущими в разных частях света и в разные эпохи, открывает сознание, развивает воображение и, как итог, является одновременно и источником познания, и катализатором развития искусства и науки. По этим причинам является естественным то, что и сегодня в нашей стране существует государственная книжная сеть.

На сегодняшний момент в состав книжного предприятия ГУП «Объединённый центр «Московский дом книги»» входят 26 магазинов, 5 из которых являются специализированными, а остальные находятся в разных районах города, что позволяет жителям выбрать наиболее близкий к дому книжный магазин. В среднем 400 000 посетителей ежемесячно посещают магазины сети. Стоит заметить, что для сохранения культурного наследия стратегически важно не только сохранять текущие

магазины, но и открывать новые, так как обычно аудитория одного книжного пространства не переходит в другое, а с высокой вероятностью перестаёт покупать книги. К сожалению, сегодня существует катастрофически мало книжных магазинов: в России на 147 млн человек – 1000 магазинов; из них в Москве – 200 магазинов на 13 млн жителей, в Санкт-Петербурге – 200 магазинов на 6 млн жителей. На данный момент Москва и Россия в целом существенно отстают от других стран по количеству книжных магазинов на душу населения, которые являются частью культурного и образовательного пространства, важным каналом доступа граждан к литературному богатству и наследию страны. Например, во Франции на 66 млн человек приходится 3500 книжных магазинов, в Германии на 86 млн человек – 4500 книжных магазинов. Это наглядно говорит о том, что сегодня назрела острая необходимость совершенствования инфраструктуры чтения и, как следствие, обеспечения доступности наших граждан к огромно-

му литературному богатству страны и мира.

Просветительская деятельность ведётся с момента основания Московского Дома Книги. Это одно из тех обстоятельств, которое позволяет книжному магазину и в настоящее время оставаться любимым и самым посещаемым москвичами и гостями столицы.

Московский Дом Книги, главный и центральный магазин сети, расположен на Новом Арбате и стоит в ряду городских достопримечательностей, являясь символом книжной столицы.

За долгие годы существования Московский Дом Книги – с 1967 года и по настоящее время – пережил немало изменений. Несмотря на преобразования внешнего порядка, внутренних изменений в политике магазина нет. Все идеи, которые были заложены при создании книжного магазина на Арбате, сотрудники стараются бережно поддерживать и развивать, создавая особое пространство, интересное посетителям. Благодаря этому, книголюбцы приходят не только купить какую-то книгу, но и задержаться здесь, остановиться перед стеллажами, полистать, почувствовать уютную атмосферу, встретиться с авторами. На этажах удобно расставлены скамейки, кресла и столики, открыто Литературное кафе, что помогает спокойно сделать выбор книг и журналов. По площади (4500 кв.м.) магазин является одним из крупнейших в Восточной Европе, поэтому на полках можно найти широкий выбор художественной, научной и научно-популярной литературы, в том числе на иностранных языках, учебные пособия и периодические издания, включая научные альманахи, более 158 000 названий книг. Московский Дом Книги постоянно меняется, совершенствуются выкладки, растёт количество проводимых мероприятий. В 2018 году было проведено 650 встреч с выдающимися современниками, среди которых – деятели искусства, писатели, политики и учёные.

Активно развиваются и специализированные магазины книжной сети: Дом Книги на Камергерском, недавно открывшийся Дом Дет-



ской Книги на Калужской площади, Дом Технической Книги на Ленинском проспекте.

В 2018 году Дом Книги на Камергерском (ранее Дом Педагогической Книги) был отреставрирован. В Доме Книги на Камергерском активно ведётся культурно-просветительская деятельность, регулярно проводятся встречи с авторами и общественными деятелями, презентации новых изданий в двух лекториях. В частности, проходят популярные еженедельные ВОИРтехнозавтраки – встречи, на которых талантливые изобретатели представляют свои проекты, помогающие людям реализовать и внедрить в жизнь самые смелые идеи.

В июне 2019 года был открыт ещё один магазин сети. Основная идея создания Дома Детской Книги, книжного пространства, понятного и родителям, и детям, заключалась в организации интересной площадки для подрастающего поколения с объединяющим центром этой территории – книгой.

Открытие такой площадки в сердце столицы – дополнительная возможность для вовлечения детей и подростков в культурное пространство, чтение и познание, что в свою очередь позволит формировать будущую интеллигенцию России.

Особо следует отметить уникальную достопримечательность научной Москвы – Дом Технической Книги на Ленинском проспекте.

Впервые магазин появился в виде «Технической книги» в Москве в 1922 г. В сентябре 1962 г. было выделено новое помещение на Ленинском проспекте в доме № 40. Это было двухэтажное здание – одно из лучших и крупнейших в Москве того времени. 900 кв.м. торговых площадей, оборудованных удобными прилавками, стеллажами для книг, мебелью для покупателей и складскими помещениями.

В 1963 г. состоялось торжественное открытие «Технической книги», где проводились встречи с издателями, авторами книг, учёными, артистами. При магазине был организован клуб читателей «Эврика», получивший в дальнейшем широкую известность среди москвичей и гостей Москвы.

И сегодня Дом Технической Книги остаётся одним из научных центров столицы, в котором представлено более 47 000 наименований книг.

Магазин на Ленинском проспекте, д. 40 даёт возможность не только приобрести книги, но и провести в своих стенах время максимально полезно, поскольку представляет собой просветительскую площадку, где собираются люди, интересующиеся наукой. В Доме Технической Книги также проходят презентации книг, встречи с авторами, журналистами, общественными деятелями. В 2018 году открыт новый Научный клуб, в рамках которого были проведены 54 встречи, в том числе с молодыми учёными на базе магазинов сети. С образовательными лекциями перед аудиторией выступают как молодые начинающие специалисты, так и именитые учёные, в том числе победившие в премии «Просветитель». В 2008 году была учреждена премия за лучшую научно-популярную книгу на русском языке, и с тех пор её задачей является поддержка русскоязычных учёных и научных журналистов, умеющих просто и увлекательно рассказать о новейших открытиях и исследованиях.

Диалоги о науке проходят в окружении множества изданий соответствующей тематики: монографии, сборники научных трудов по физике, химии, математике, естественным наукам, учебные пособия. Также можно приобрести редкие издания, которые сложно найти в других магазинах, ведь в магазине представлено более 7400 названий. Для любителей полистать издания прошлых лет работает букинистический отдел.

В современном мире книжный магазин не может оставаться архаичным: необходимо постоянно развиваться, совершенствовать выкладки, обновляться, создавая комфортное, а главное, уникальное пространство, объединяющее вокруг книг и искусство, и науку, которое превращается в социально-культурное и научное пространство, продолжая вовлекать подрастающее поколение в чтение, в том числе через встречи с интересными современниками. Но так

как государственная книжная сеть расположена только в Москве, то сотрудники постоянно осуществляют сбор книг для библиотек, расположенных в отдалённых посёлках, сёлах и деревнях, и для фондов, которые передают книги и учебные материалы для многодетных и малообеспеченных семей, ко дню знаний передают школьные ранцы, полностью собранные для занятий. Недавно были переданы книги для хосписов.

В 2018 году был открыт уникальный арт-проект «Окно в искусство». Витрины центрального магазина Московского Дома Книги были преобразованы в площадку, сделавшую возможным заочный диалог художников и скульпторов со зрителями. За год существования галереи более чем 200 000 человек получили доступ к предметам живописи, скульптуры, декоративно-прикладного искусства.

Летом 2019 года открылось художественное пространство в Доме Книге на Камергерском, где представлены работы выдающихся мастеров XX и XXI веков, а также – в Доме Детской Книги. Основной темой арт-площадки детского магазина стали дети; в частности, запланированы выставки учеников художественных школ, что стимулирует стремление совершенствовать мастерство.

Как развитие научной площадки, витрины Дома Технической Книги тоже были преобразованы в арт-пространство. Музеи столицы получили возможность расширить выставочное пространство и представить новым зрителям познавательные экспозиции, представляющие области точных и естественных наук. Одной из миссий является поддержка российской научной школы через выставки, посвящённые ярчайшим личностям прошлого и современности.

Сбережение литературы, языка – основа сохранения самоидентификации нации, поэтому основной миссией ГУП «ОЦ «МДК» является развитие культуры чтения, вовлечение подрастающего поколения в культурное пространство.

Однако без науки великая держава существовать не может. Важно заниматься мононауками: без их развития не возникнет междис-

циплинарных дисциплин, так как люди, занимающиеся мононауками, открыты и другим наукам; в итоге получают совместные научные работы и публикации. Площадки ГУП «ОЦ «МДК» открыты для проведения конференций, круглых столов, лекций, предоставляя возможность общения современным учёным между собой и с другими людьми, интересующимися наукой.

Московский Дом Книги признаёт, что будущее не только за литературой, живописью и другими видами искусства, но и за научными открытиями. Именно поэтому так активно ведётся работа по развитию, распространению и сохранению знаний для следующих поколений. Благодаря этому сегодня с уверенностью можно сказать, что, например, Дом Технической Книги – именно то место, куда стоит идти за свежими идеями и интересными книгами, где можно узнать о новых открытиях, получить базовые знания или обсудить углублённо научные теории с единомышленниками, аргументировано

поспорить в поиске истины с представителями других направлений.

Московский Дом Книги стремится проводить активную популяризаторскую деятельность, знакомить специалистов с достижениями самых различных важных отраслей науки. Именно этим объясняется установление и развитие творческих контактов с редакцией журналов «Светотехника» и «Light&Engineering», публикации в которых раскрывают удивительные широкие возможности зрительных и незрительных световых технологий.

Важно иметь в виду, что в нашей стране работают миллиарды самых различных источников искусственного света, а в таких городах как Москва и Санкт-Петербург, на освещение расходуется около 25 % всей потребляемой в городах электроэнергии. Редколлегия этих журналов на русском и английском языке (по 6 выпусков каждого в год), даёт систематическую информацию о всех достижениях в мире в этой области науки и техники.

Начинанием является выпуск первых номеров журнала Светотехника для школьников и их родителей, которые популярным языком рассказывает об истории использования света, различных световых явлениях в природе и науке, о важности хорошего освещения и технологического использования света для развития человечества.

Кроме того, большой интерес представляет новое четвёртое издание «Справочной книги по светотехнике» – учебное пособие для электротехнических университетов, а также архитекторов, строителей, светодизайнеров, врачей-гигиенистов. Книга объёмом 900 страниц с цветными иллюстрациями в настоящее время находится в печати.

Вся эта литература будет представлена на стендах магазинов сети Московского Дома Книги.

Авторы статьи:

*Наталья Дмитриевна Короткая,
коммерческий директор ГУП «ОЦ «МДК»*

*Татьяна (Яна) Львовна Карташева,
заместитель коммерческого директора
по маркетингу ГУП «ОЦ «МДК»*

ПАРТНЁРЫ ЖУРНАЛА

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





СветоСервис
ТЕЛЕМЕХАНИКА



Экономия



Безопасность



Энергосбережение

Управление освещением – залог безопасности!



129626, г. Москва,
1-й Рижский переулок, дом 6



www.svs-tm.ru



(495) 780-75-98

**Оформить подписку или купить статью Вы можете на сайте журнала
«Светотехника / Light & Engineering»
www.e-l-journal.com**

Стоимость подписки на журнал «Светотехника»

№	Наименование журнала	Версия	Период	Цена	Кол-во
1	«Светотехника»	бумажная	2 месяца	1 500 руб.	1 экз.
2	«Светотехника»	электронная	2 месяца	1 000 руб.	1 экз.
3	«Светотехника»	бумажная	Полугодие	4 500 руб.	3 экз.
4	«Светотехника» для физ.лиц	электронная	Полугодие	3 000 руб.	3 экз.
5	«Светотехника» для юр.лиц	электронная	Полугодие	6 000 руб.	3 экз.
6	«Светотехника»	бумажная	Год	9 000 руб.	6 экз.
7	«Светотехника» для физ.лиц	электронная	Год	6 000 руб.	6 экз.
8	«Светотехника» для юр.лиц	электронная	Год	12 000 руб.	6 экз.

Стоимость журнала «Light & Engineering»

№	Наименование журнала	Версия	Период	Цена	Кол-во
1	«Light & Engineering»	бумажная	2 месяца	40 долл. США	1 экз.
2	«Light & Engineering»	электронная	2 месяца	35 долл. США	1 экз.
3	«Light & Engineering»	бумажная	Полугодие	80 долл. США	3 экз.
4	«Light & Engineering» для физ.лиц	электронная	Полугодие	70 долл. США	3 экз.
5	«Light & Engineering» для юр.лиц	электронная	Полугодие	140 долл. США	3 экз.
6	«Light & Engineering»	бумажная	Год	160 долл. США	6 экз.
7	«Light & Engineering» для физ.лиц	электронная	Год	140 долл. США	6 экз.
8	«Light & Engineering» для юр.лиц	электронная	Год	275 долл. США	6 экз.

Стоимость статьи из журналов «Светотехника» и «Light & Engineering»

№	Наименование журнала	Версия	Кол-во	Цена
1	«Светотехника»	электронная	1 экз. статьи	400 руб.
2	«Light and Engineering»	электронная	1 экз. статьи	6 долл. США*

*Примечание: по курсу ЦБ на дату оплаты

Стоимость журнала «Светотехника для детей и их родителей»

№	Наименование журнала	Версия	Цена	Кол-во
1	«Светотехника» для детей	бумажная	1 500 руб.	2 экз.
2	«Светотехника» для детей	электронная	300 руб.	2 экз.

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: lav@e-journal.com