

СВЕТО

5 · 2019

ТЕХНИКА



Наши преимущества:

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

Качество
Надежность
Оперативность



Россия, г. Москва,
проспект Мира, 106



opora-e.com



(495) 785-37-40



Реализуем проекты освещения любого уровня сложности



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



info@spb.svsrv.ru
svetoservis.ru



+7 (812) 448-57-19

Лихославльский
завод «Светотехника»

Российское производство

с качеством мирового уровня

- ▶ Наука
- ▶ Технологии
- ▶ Опыт
- ▶ Признание
- ▶ Экспорт



Более **50** серий и
свыше **1000**
модификаций
продукции

171210, Тверская область, г. Лихославль,
Первомайская улица, 51, тел: (48261) 3-59-04

www.galad.ru www.bl-g.ru



Уважаемые читатели!



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

Истекший период оказался чрезвычайно богат на светотехнические события: Международная научно-техническая конференция по применению светодиодных фитооблучателей, выставка *Interlight | Intelligent building Russia*, презентация 4-е издания Справочной книги по светотехнике, конференция «Молодые светотехники России», лучшая конференция по компьютерной графике «Графикон-2019» в г. Брянске, X Международная конференция «Современные проблемы оптики естественных вод (ONW 2019)» в Санкт-Петербурге. Всё это – значимые события, о каждом из которых следует поговорить отдельно, но для меня важным вопросом, их всех объединившим, являются проблемы светотехнического и вообще инженерного образования. Этим проблемам было посвящено специальное заседание секции образования отраслевого НТС по светотехнике, в котором приняли участие специалисты различных компаний. Обсуждение вопросов на заседании получилось очень заинтересованным и оживленным.

Инженерное образование всегда было связано с запросами индустрии и всегда сильно изменялось вслед за ней, особенно сильно – в периоды так называемых индустриальных революций. Сейчас мы переживаем вторую цифровую революцию, когда оцифровке подвергается даже то, что ранее и не предполагалось. Самый яркий пример – переход в транспорте на движение без водителя. Особенностью этой революции в образовании является смена знаний быстрее пятилетнего срока обучения в университете, что, естественно, требует пересмотра системы подготовки инженеров. Необходимо отметить доступность знаний через Интернет, так что не имеет смысла в образовании сосредотачиваться на общих местах, бесконечно повторять в учебниках уже известные

истины. Необходимо сосредоточиться на новых, прорывных направлениях, которые к окончанию срока обучения станут главными тенденциями в промышленности.

Надо учесть, что в России образование по своей сути остаётся советским, а страна давно живёт в рынке: выпускников не распределяют, они устраиваются сами, причём подавляющее большинство – ещё с младших курсов. В большинстве своём они уже достаточно хорошо представляют, что им нужно для работы и профессионального роста, а потому часто с трудом воспринимают обучение теории ради. Учение превращается в мучение для получения диплома.

Быстрое развитие цифровых технологий имеет и оборотную сторону, которая в настоящее время приобрела форму так называемого «цифрового слабоумия». Получило распространение поверхностное сетевое и «гаджетовое» образование: на кнопку нажал и сделал то, чему раньше надо было учиться 5 лет, что зачастую не смогут сделать старые преподаватели, а потому всё есть в Википедии и сети, в умных программах, сделанных на мудром Западе, надо только их найти и научиться пользоваться. Любая ситуация, отличная от шаблона «красной кнопки», без необходимого теоретического фундамента приводит современных выпускников в ступор.

Однако суть, основа инженерного образования должна быть сохранена и сегодня: сочетание фундаментальной теоретической подготовки с практическими навыками квалифицированного рабочего. В этом смысле самой неэффективной формой обучения студентов являются лекции. Второй по неэффективности формой являются семинары – ответы на вопросы по заранее выбранной теме. Самой эффективной формой, способной в обучении объединить фундаментальную подготовку с приобретением практических навыков, является работа над конкретным проектом. В этом случае руководитель проекта может прочитать лекцию по возникшему теоретическому вопросу, но одновременно и передать навыки создания установки. При этом теория увязывается с решением конкретных проблем, что делает её ясной и понятной. Нельзя не признать, что в настоящее время в обучении пре-

обладает неэффективная лекционная форма. Назначение лекций – в изложении фундаментальных, мировоззренческих вопросов.

Особое значение имеют программы подготовки светотехников. В настоящее время они остаются во многом такими, какими сформировались в нашей стране в 1930-е гг. на основе немецких и французских учебников ещё до Первой Мировой войны. В прошлом году на страницах нашего журнала прошла дискуссия по изменению формулы специальности ВАК «Светотехника», в результате которой был сформулирован современный паспорт специальности, отвечающий современным тенденциям развития науки. Однако паспорт специальности не раскрывает программу обучения светотехников. На основании паспорта необходимо сформулировать набор требований к специалисту, для того, чтобы он мог проводить соответствующие исследования. Говоря словами Л.Д. Ландау, сформулировать теорминимум специальности. На основе теорминимума можно определить соответствующие дисциплины, определить им необходимую форму обучения, на основании чего сформулировать список учебников, необходимых для образования.

Существенно точно и однозначно определить деление программ бакалавров и магистров. Представляется, что подготовка бакалавра должна соответствовать советской квалификации техника, что должно определить для них учебники по специальности с большей практической направленностью. Учебники для магистров должны соответствовать фундаментальной подготовке направления, причём максимальное внимание следует уделять новейшим направлениям развития науки. Отметим, что журнал «Светотехника» должен занять важное место в светотехническом образовании, ведь подготовка учебника – долгий процесс, а статья вводит студента непосредственно в мир актуальных исследований. Важно и то, что нет чёткого определения магистерской диссертации. Представляется, что наилучшим определением магистерской диссертации является подготовка в её рамках публикации в рецензируемом журнале, которым уже многие десятилетия является «Светотехника».

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. Шахпаруняц, 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. Будак, 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; lampstech@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; fpa@l-e-journal.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 16.09.19. Подписано в печать 09.10.19
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 5·2019

В НОМЕРЕ

СЕНТЯБРЬ • ОКТЯБРЬ

Колонка главного редактора	3	температуры, освещённости и насыщенности цвета объекта – новая метрика	64
Бизнес и инновации	12, 19, 28, 48, 53, 63, 75		
Щепетков Н.И., Капелева С.Б., Бугаев Д.В., Матовников Г.С., Костарева А.С. О концепции светоцветовой организации городской среды в центральной части Тюмени.....	6	Заева-Бурдонская Е.А., Назаров Ю.В. Сцена в свете софитов. Парадоксы профессии: художник, свет, театр	76
Карли Н., Сперлинг А., Бизяк Г. Реализация лабораторного образца настраиваемого многоцветного источника света	13	Будак В.П., Гримайло А.В. Влияние поляризации света на световое поле в сценах с многократным отражением	84
Кондратьева Н.П., Филатов Д.А., Терентьев П.В. О зависимости уровня гармоник тока тепличных облучателей от уровня питающего напряжения.....	20	ХРОНИКА	
Ёзтюрк Э., Актас М., Шеньюз Т. Анализ и измерение воздействия солнечного излучения на фары автомобилей	23	Серый Е.С., Федорищев П.А. Международная научно-практическая конференция по применению светодиодных фитооблучателей.....	90
Хун Ч.-М., Ли К.-Л., Лин Ч.-Е., Чен М.-В., Ву Д.-Д. Разработка модуля торцевой подсветки для автостереоскопического дисплея.....	29	Титаренко М.И. Заседание редколлегии журнала «Светотехника»	92
Манав Б. Световая среда и воспринимаемая среда.....	35	ИСТОРИЯ СВЕТОТЕХНИКИ	
Ерохин М.М., Камшилов В.Г., Терехов В.Г., Туркин А.Н. Исследование характеристик светодиодов для фитооблучателей	42	Лесман А.Е., Федорищев П.А. Светотехническое общество России: от учредительного съезда советских светотехников до первой интернет-конференции.....	94
Соловьёв А.К., Жуйпу Б. Выбор площади оконных проёмов жилых зданий в условиях муссонного климата Дальнего Востока РФ и северных районов КНР	49	ИНФОРМАЦИОННЫЕ МАТЕРИАЛЫ	
Ручкина Г.Ф., Павликов С.Г., Матвеева Е.Ю. Оптимизация освещённости объектов муниципальных образований и защита розничных потребителей электроэнергии: взаимообусловленность процессов.....	54	СветоСервис–СПб реализует проекты любого уровня сложности.....	1
Терехов В.Г. Система облучения для автоматизированной многоярусной фитоустановки типа «City Farm»	59	Лихославльский завод «Светотехника»: российское производство с качеством мирового уровня.....	2
Винь К.Т., Бодроги П., Кхан Т.К., Ань Т.Т. Зависимость цветового предпочтения от коррелированной цветовой		Светлые решения для умного города: МСК «Боос Лайтинг Групп».....	40
		Архитектурное освещение главного фасада здания Тюменской областной Думы.....	1 с. обл.
		Opora Engineering: Качество, надёжность, оперативность	2 с. обл.
		Инновационные решения в освещении для столицы и регионов	3 с. обл.
		Информация об оформлении подписки и покупке статей	4 с. обл.

О концепции светоцветовой организации городской среды в центральной части Тюмени

Н.И. ЩЕПЕТКОВ¹ *, С.Б. КАПЕЛЕВА², Д.В. БУГАЕВ²,
Г.С. МАТОВНИКОВ¹, А.С. КОСТАРЕВА²

¹ Московский архитектурный институт (государственная академия), Москва;

² Тюменский индустриальный университет (ТИУ), Тюмень

*E-mail: n_shchepetkov@inbox.ru

Аннотация

Системно рассмотрены состояние городского освещения в центре Тюмени (с учётом проведённых натурных исследований) и перспективы его развития на основе разрабатываемого концептуального проекта светового генплана центральной части города. Изложены основные идеи этого генплана, методические принципы и критерии оценки проектных решений, иллюстрированные фотографиями, схемами и визуализациями освещаемых объектов.

Ключевые слова: светоцветовая организация городской среды, светодизайн, световой генплан, световой «каркас» и «ткань» светопланировочной структуры города.

Тюмень – административный центр огромного региона Западной Сибири, относящийся к числу городов, богатых историко-архитектурным наследием, культурой и ландшафтом. Древний центр Тюмени, первого русского города в Сибири, основанного в 1586 г. на стрелке высокого мыса между реками Тура и Тюменка [1], отмечен площадью (где сходятся улицы Ленина и Республики) с памятником в честь осно-

вания города. В 1601 г. в городе учредили первый за Уралом ям, а в 1843 г. спустили на воду первый в Сибири паровой пароход. В 1941–1945 гг. в Тюмени хранили саркофаг с телом В.И. Ленина. С 1953 г. она – нефтегазовая столица Сибири. К концу XVII в. в ней проживало около 3 тыс. человек [2], а сегодня растущий город насчитывает около 770 тыс. жителей. Складывался он как торговый центр, через который проходило множество транспортных путей. Его современная застройка осуществляется как на свободных периферийных территориях, так и в уплотняемых районах сложившихся малоэтажных кварталов, нередко с сопутствующими проблемами сохранения историко-архитектурного наследия.

Это единственная столица субъекта РФ, где губернатор упразднил должность главного архитектора города, но в смотре-конкурсе городов России в 2017 г. в номинации «Лучший город России для проживания» Тюмень заняла первое место.

В городе несколько университетов, и в том числе федеральный Тюменский индустриальный университет (ТИУ), образованный в 2016 г. путём слияния Архитектурно-строительного

университета (ТюмГАСУ) и Тюменского государственного нефтегазового университета (ТГНГУ). В 2012 г. создан Институт архитектуры и дизайна (АРХИД), объединивший две профильные кафедры ТюмГАСУ: «Архитектура» и «Дизайн архитектурной среды». В рамках образовательной, научно-исследовательской и международной деятельности он осуществляет ряд проектов по развитию архитектурной среды и сохранению историко-культурного наследия города и области, а с 2003 г. проводит и Международный молодёжный архитектурно-художественный фестиваль «Золотая АрхИдея», с конкурсами творчества детей и молодёжи и научными конференциями. Ежегодно студенческие проекты АРХИД занимают призовые места на международных смотрах-конкурсах по архитектуре и дизайну. Многие его выпускники успешно трудятся не только в Тюмени, но и в других регионах России и за рубежом.

С 2016 г. АРХИД (в составе ТИУ) разрабатывает концептуальный стратегический проект «Архитектурный образ региона», направленный на формирование инновационного комфортного и инвестиционно привлекательного образа региона в сложных климатических условиях Сибири, повышение роли архитектуры как неотъемлемой и презентабельной части его истории и культуры, адаптацию исторически сложившейся среды под современные реалии с сохранением ценного наследия. Один из разделов проекта – «Создание светоцветового образа региона и центральной части Тюмени в части светодизайна, колористики и благоустройства» – разрабатывается совместно с МАРХИ (ГА). В список исследуемых городов вошли



Рис. 1. Схема соответствия уровня освещённости пешеходных зон улицы Ленина нормативам СП 52.13330.2016, на основании отчёта по инструментальному обследованию приоритетных объектов городской среды (август 2017 г.)

также Тобольск, Салехард и Ялуторовск.

В рамках проекта проведено комплексное предпроектное исследование, определены приоритетные территории и объекты, выявлены их иерархия и проблемы. В первую очередь, были выбраны «гостевые» улицы, с которых начинается знакомство приезжих с городом. Дороги от аэропорта, авто- и железнодорожного вокзалов пересекаются в центре города и совпадают с его историческим планировочным «каркасом». К их числу относится ул. Ленина (до революции – Спасская), пронизывающая ряд общественных пространств и связывающая Ямскую ул. (ведущую в международный аэропорт «Рошино») и Первомайскую (идущую до Привокзальной площади). Улица (протяжённостью 2,5 км с сохранившимися памятниками архитектуры, истории и культуры) является ансамблем городского значения. Ранее на ней стояли храмы четырёх конфессий – церкви Михаила Архангела и Спасская, римско-католический храм Святого Иосифа, мусульманская мечеть и синагога, некоторые из которых утрачены.

Основная задача раздела «Светодизайн» проекта – «создание концепции и методики цветоцветовой организации городской среды с учётом региональных особенностей при эффективном использовании энергосберегающих технологий с комплексным и системным решением проектных задач городского освещения и архитектурной колористики».

В 2017 г. с участием преподавателей и студентов ТИУ были проведены визуальные и инструментальные натурные обследования с фотофиксацией ситуаций в дневное и вечернее время и с измерением существующих светотехнических параметров освещения в центральной части Тюмени в пешеходных пространствах (рис. 1) и на фасадах ряда архитектурных объектов на гостевых улицах, площадях и скверах исторического центра. Картина получилась весьма пёстрая и контрастная: измеренные уровни горизонтальной освещённости E_T и неравномерности её распределения на покрытиях тротуаров, дорожек и аллей отличались от нормируемых в разных зонах в меньшую (вдвое) или, реже, большую (аж впятеро) стороны, как и яркость освещён-

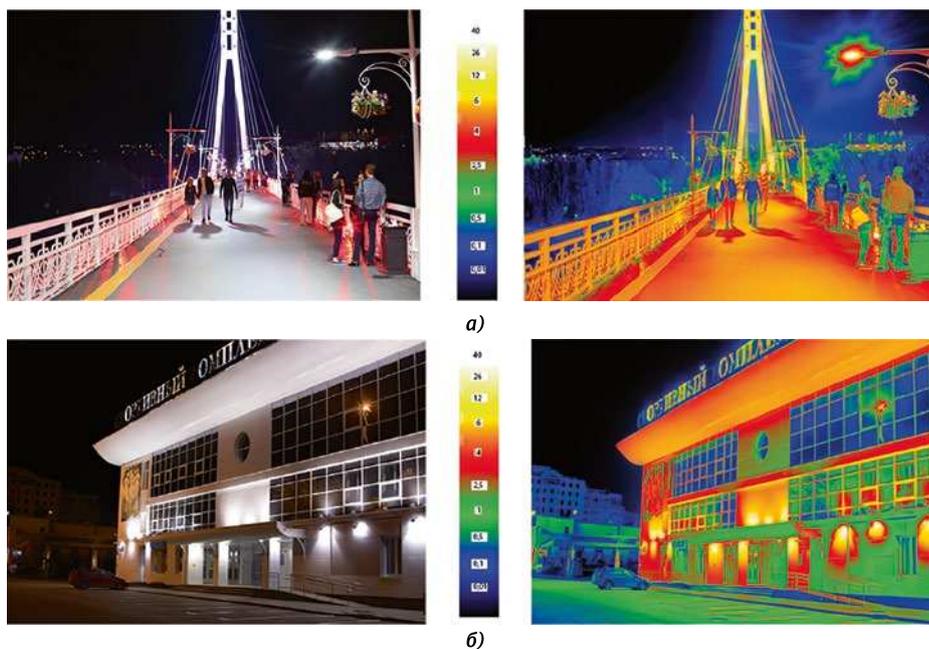


Рис. 2. Вечерние фотографии освещённых объектов с распределением яркости на них в псевдоцветах: а – цветодинамичное освещение пешеходного вантового «Моста влюблённых» через реку Туру на стрелке ул. Ленина и Республики; б – главный фасад СК «Центральный»

Рис. 3. Архитектурное освещение главного фасада здания правительства Тюменской области на пл. Ленина (а) и здания Тюменской областной Думы (б)



ных фасадов выбранных зданий и сооружений (рис. 2).

На основе обследований выполнен анализ состояния световой среды в центре Тюмени и качества архитектурного освещения значимых объектов, выявлены характерные недостатки световой среды: в частно-

сти, неравномерное, недостаточное или избыточное освещение, искажающее пластику фасадов, ослепляющее пешеходов и др. [3]. При этом всё ещё сохраняется традиционное для многих городов (не только российских) доминирование в уличном освещении, в т.ч. в пешеходных зонах, жёл-



Рис. 4. Дома Г.Т. Молодых (а) и М.А. Брюханова (б) – образцы каменной застройки второй половины XIX – нач. XX вв. с торговыми помещениями на первом этаже (на Первомайской ул.) – в свете рекламного освещения, чуждого характеру исторической архитектуры; Тюменский НИИ краевой инфекционной патологии (в); здание Сбербанка в зелёном свете (г)



Рис. 5. Цветодинамичное освещение «Моста влюблённых» (а) и исторического корпуса ТюмГАСУ – ТИУ (б)

того света НЛВД. ОП с разрядными и СД источниками белого света составляют пока малую долю (год от года растущую, но без видимой системы очередности и приоритетности). В уличных ОУ преобладают архаич-

ные воздушные линии электропитания и примитивный дизайн (за некоторым исключением) светильников на опорах, в т.ч. ретросветильников с неэффективным светораспределением.

В городе сотни зданий и сооружений, оборудованных установками фасадного архитектурного освещения (АО) и световой рекламы разного качества – от советских монументально-классических дворцов прави-

тельства Тюменской области (рис. 3, а) и областной Думы (рис. 3, б) со «скромным», не совсем тектоничным локально-пятнистым освещением, до небольших частных объектов со световыми шнурами. В общем используется едва ли не весь арсенал светотехнических средств и светоконпозиционных приёмов, не всегда художественно пригодных для исторических зданий (рис. 4, а и б), но создающих весьма декоративный «пуантилистический» эффект на современных витражных фасадах (рис. 4, в) или символический цветной облик зданий (рис. 4, г).

Штучность и разностильность АО объектов городского значения, характерные в той или иной мере для всех городов России, включая Москву, не позволяют говорить о сформированности значимых для Тюмени и региона гармоничных светоурбанистических ансамблей. Например: цветодинамичное освещение пешеходного вантового моста через реку Тура хорошо воспринимается издалека, но не вблизи, где ощутим слепящий эффект из-за неточностей в монтаже и нацеливании ОП; изменяющаяся цветность освещения фасада ТюмГАСУ (корпус ТИУ, исторически – училище Колокольникова) не вполне соответствует статусу неоклассической постройки начала XX в. (рис. 5). Правда, существующее АО ряда объектов заслуживает положительной оценки, как, например: традиционно заливающее белым светом АО Крестовоздвиженской и Спасской церквей (рис. 6); АО комбинированным светом драмтеатра (рис. 7, а) и – цветным светом ТЦ «Орион» (рис. 7, б). Но пока, к сожалению, не освещены главные историко-архитектурные доминанты центра города – Свято-Троицкий монастырь и Вознесенско-Георгиевская церковь.

Режим функционирования ОУ некоторых названных объектов непредсказуем (светит – не светит), юстировка, количество горящих ОП и цветность ИС в единой группе ОП разбалансированы. Это дефекты работы эксплуатационных служб, свойственные также в той или иной мере не только российской практике городского светодизайна.

На основании материалов натуральных исследований и современных светодизайнерских идей и методик разрабатывается концепция светово-



Рис. 6. Прожекторное освещение памятников архитектуры XVIII в. Крестовоздвиженской (а) и Спасской (б) церквей



Рис. 7. «Классическое» освещение Тюменского драматического театра (а) и цветное современное освещение ТЦ «Орион» (б)

го генплана центральной части Тюмени¹, которая может служить стратегическим системно-дисциплинирующим документом при текущей

и перспективной реконструкциях городского наружного освещения в комплексе общепластово-строительных работ. В ней решаются три группы взаимосвязанных и наиболее значимых светоурбанистических задач – светопланировочные, светопространственные и образно-художественные [4]. Светопланировочные задачи све-

¹ Авторский коллектив: Н.И. Щепетков, С.Б. Капелева, А.И. Клименко, В.Д. Бугаев, Г.С. Матовников, А.С. Костарева, О.А. Горькова.

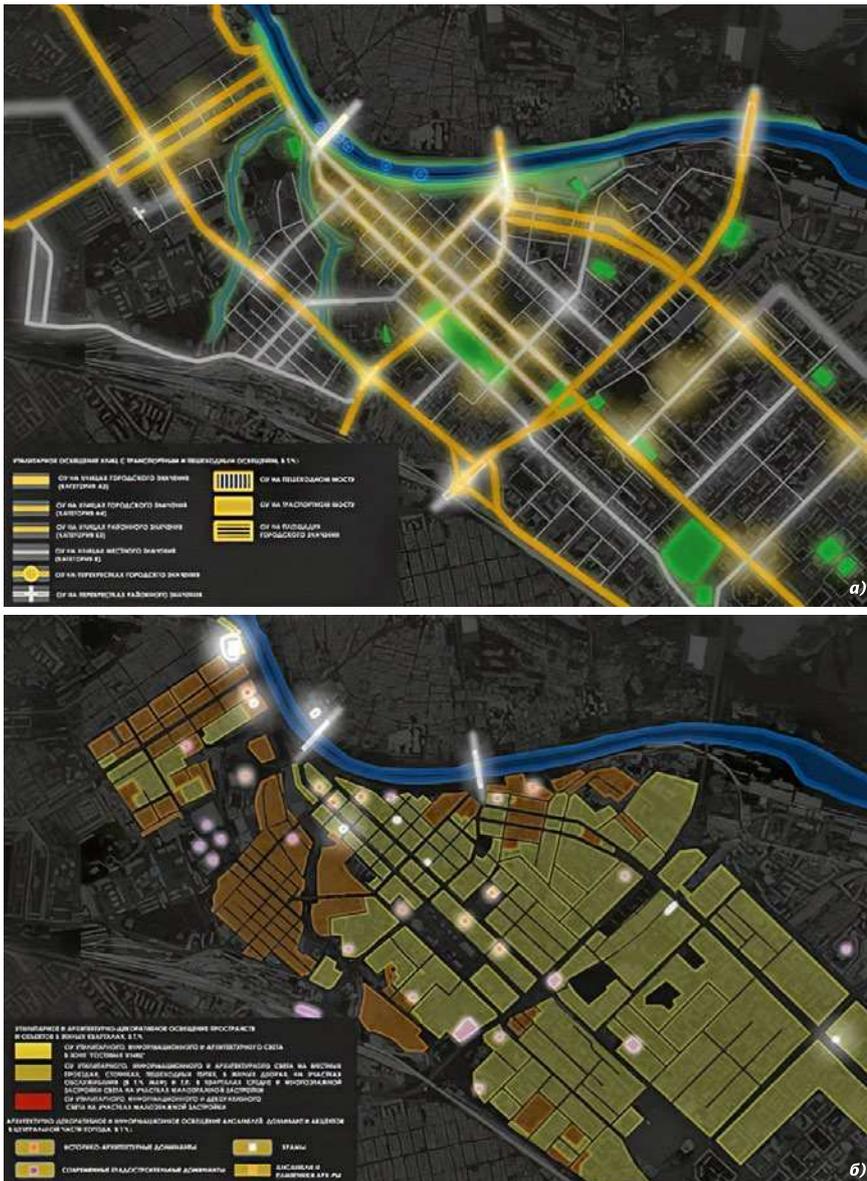


Рис. 8. Световой генплан центральной части Тюмени: а – урбанизированный и природный «световой каркасы»; б – «световая ткань» и система световых доминант

тоцветового зонирования территории базируются на классификации элементов генплана (по А.Э. Гутнову) на «урбанизированный» (транспортные и пешеходные улицы и площади), природный (зелёные массивы и водоёмы) «каркас» и межмагистральную «ткань» (участки селитебной застройки). Создание видимых ночью различий в уровнях и цветности освещения элементов «каркаса» и «ткани» с учётом их градостроительной иерархии служит главным инструментом решения этой задачи, в основном установками утилитарного уличного освещения разного масштаба и дизайна в транспортных и пешеходных зонах, обеспечивающими нужный уровень и качество освещения.

И если количественные характеристики (яркость и освещённость на дорожном полотне, полуцилиндрическая освещённость в пространстве некоторых пешеходных зон) и их распределение регламентированы нормами, то выбор цветности освещения в разных пространствах является проблемным вопросом в связи с приходом ОП с СД и ожидаемым уходом НЛВД из города, что в некотором смысле даёт потерю одного из инструментов цветоцветового зонирования городского пространства. Концепцией предусмотрена поэтапная замена жёлтого света ОП с НЛВД в уличном освещении на белый свет ОП с СД с разной $T_{ки}$ в разных зонах (белый свет внедряется в первую оче-

редь на центральных «гостевых» улицах и площадях).

В решении задачи цветопространственной организации городской среды прогнозируется использование всех трёх основных групп ОП – утилитарного, архитектурного и светоинформационного освещения. Особое внимание уделяется освещению пешеходных пространств [5]. Световая среда города, благодаря освещению земли и фасадов формирующих её объектов приобретает трёхмерность. Её оптическая структура являет собой прерывно-непрерывную систему модулированных светом, с тем или иным ритмом, дискретных, гетерогенных по светотехническим параметрам пространств разного масштаба, назначения и иерархического уровня, в которой должна, в свою очередь, выделяться доминирующая в световой композиции города, очень важная для него иерархизированная система световых ансамблей и доминант. Светомодулировка проводится на базе концептуального цветоцветового зонирования выбором соответствующих средств и режимов освещения поверхности земли и объектов, формирующих световую среду в конкретных ситуационных пространствах, и световые архитектурные ансамбли, радикально отличные от дневных по своим образным характеристикам.

Световые ансамбли и доминанты рассчитываются на вечернее восприятие их с дальних, средних и ближних дистанций, для чего в концепции намечаются туристические точки обзора светопанорам и глубинных световых перспектив, хотя в основном равнинная и относительно малоэтажная Тюмень даёт для этого пока мало оснований.

Содержанием концептуальной образно-художественной задачи освещения являются зримое выявление и творческая интерпретация выразительных черт и характерных признаков архитектурной формы объектов и ансамблей, создание их оригинальных световых образов по принципам ассоциативного подобия дневному образу или создания альтернативного «контробраза» [4].

Как показали натурные обследования, лучшие примеры АО объектов в центре Тюмени, в т.ч. памятников архитектуры, следуют первому принципу, масса других – разнообразно компромиссны и неоднозначны.



Рис. 9. Компьютерные визуализации фрагментов вечерней световой среды в эскизных проектах благоустройства по ул. Ленина

Итак, на световом генплане центра Тюмени структурируется «урбанизированный» и «природный» световые каркасы (рис. 8, а) и межмагистральные участки селитебной застройки – планировочной «ткани» города. Прогнозируется иерархия городских световых ансамблей и ночных доминант с учётом уже сложившейся ситуации и перспектив развития центра (рис. 8, б).

Неизбежная модернизация ОУ «урбанизированного каркаса» – транспортных и пешеходных улиц и площадей – уже началась с замены ОП с разрядными лампами на ОП с СД, при этом меняется дизайн элементов ОУ и цветность уличного освещения, воздушные линии электропитания где-то (к сожалению, не везде) заменяются на современные кабельно-подземные и т.д. По концепции, следует более чётко решать задачи светоцветового зонирования городских пространств, прежде всего на транспортных и пешеходные, имеющимися средствами – разными уровнями, цветностью, приёмами и режимами работы освещения, дизайном и масштабом ОУ. Эти параметры условно отражены в экспликации и пояснительной записке к световому генплану.

Аналогичные мероприятия предусматриваются и по «природному кар-

касу» и селитебной «ткани» города. При взгляде на световой генплан становится очевидно, что в центральной части Тюмени ощущается явный дефицит зелёных насаждений, как главных элементов «природного» каркаса: лишь река Тура с благоустраиваемой набережной на высоком правом берегу образует его надёжный «ствол», которому требуется развивающаяся «крона» природного происхождения в «ткани» селитебной застройки.

Классификация элементов «ткани» в центральной части города осуществляется по морфологическому признаку на два типа: кварталы с преобладанием многоэтажных современных зданий и преимущественно малоэтажная застройка с учётом её исторической ценности. Принципиально важно выбирать и обеспечивать такие светоцветовые параметры и дизайн ОУ во внутриквартальных пространствах, которые бы способствовали созданию камерной, сомасштабной человеку, зрительно комфортной и безопасной среды, вызывающей положительные эмоции.

Французы называют это качество «*ambiance*» – приятная атмосфера или, как синоним, «благоприятный психологический климат», что чрезвычайно важно в жилых дворах долгими осенне-зимними вечерами в сибир-

ском климате. Важная социальная задача дворовой и рекреационной среды и, в первую очередь, наружного освещения, – «выманить» жителей (детей с родителями, дедушками и бабушками) на свежий воздух, для общения и отдыха после рабочего дня. В решении этих вопросов должны участвовать не только господствующие в городском освещении (по количеству светоточек, расходу электроэнергии и т.п.) установки утилитарного уличного освещения в пешеходных зонах, но и другие группы архитектурного и информационного освещения.

В отличие от городских улиц и площадей, где концептуальные рекомендации могут выполняться не с нуля, а больше поэтапной реконструкцией существующих ОУ, благоустройство и освещение межмагистральных участков, во многих случаях не отвечающие современным стандартам, требуют радикальных мер. Поэтому авторским коллективом ТИУ при участии преподавателей, архитекторов и студентов параллельно с общеконцептуальными разработками ведётся более детальное и пристрастное эскизное проектирование комплексного благоустройства, в т.ч. освещения и колористики, фрагментов городской среды в центре города по ул. Ленина, Республики и др.

Образные характеристики фрагментов световой среды и световых ансамблей, обеспечиваемые разными приёмами и средствами архитектурного освещения фасадов зданий, сооружений и объектов городского ландшафта, прогнозируются в эскизных компьютерных визуализациях на развёртках застройки и в перспективных кадрах в масштабе восприятия пешехода (рис. 9).

Специфическую светодизайнерскую проблему являет АО одно- и двухэтажных, часто деревянных, исторических зданий с оригинальным декором, где использование приёмов местного освещения с монтируемыми на фасаде ОП кажется малопривлекательным. Значит, на следующих стадиях проектирования следует искать оригинальные решения ОУ. Разностильная и разновысотная застройка многих улиц с существующими в ней пространственными «прорехами» также затрудняет использование «классических» светоансамблевых приёмов, что становится очевидным при разработке световых «ленточек» застройки по обеим сторонам улиц. Поэтому идеи комплексной реконструкции архитектурной среды с широким применением малых форм, в т.ч. оригинальных светотформ, и увеличением объёма дефицитного озеленения, что заполняет эти «прорехи», представляются перспективными и находят поддержку в администрации Тюмени.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Тюмень. Справочник-путеводитель. – Свердловск: Средне-Уральское книжное издательство, 1970. – 178 с.
2. Заварихин С.П., Жученко Б.А. Архитектура Тюмени. – Тюмень: Радуга-Т, 2004. – 296 с.
3. Костарева А.С., Овчаров А.Т. Хаос в световой среде города (на примере города Тюмени) / Архитектура и архитектурная среда: вопросы исторического и современного развития – 2018: материалы международной научно-практической конференции: сборник статей; отв. ред. В.Н. Евсеев. – Тюмень: ТИУ, 2018. – С. 240–246.
4. Щепетков Н.И. Световой дизайн города // «Архитектура-С», 2006. – 320 с.
5. Матовников Г.С. Принципы формирования световой среды пешеходных улиц города (на примере Москвы) / Автореф. дис... канд. арх. – М., 2017.
6. Щепетков Н.И., Будак В.П. Итоги дискуссии по проблеме светового дизайна. Резюме редакции // Светотехника. – 2018. – № 6. – С. 74–76.



Щепетков Николай Иванович,

доктор архитектуры, профессор. Окончил в 1965 г. МАРХИ. Заведующий кафедрой «Архитектурная физика» МАРХИ (ГА). Лауреат Государственной

премии РФ (за архитектурное освещение Москвы). Заслуженный деятель искусств РФ. Член-корр. РАЕН. Член редколлегии журналов «Светотехника» и «Light & Engineering»



Капелева Светлана Борисовна,

кандидат пед. наук, профессор. Окончила в 1978 г. Свердловский архитектурный институт. Директор АРХИД ТИУ. Почётный архитектор Рос-

сии, Почётный работник высшего профессионального образования РФ, член правления тюменского отделения Союза архитекторов России и член Совета по направлению «Дизайн архитектурной среды» ФУМО в системе высшего образования по УГСН «Архитектура»



Бугаев Денис Владимирович,

архитектор. Окончил в 2002 г. УралГАХА. Доцент кафедры «Дизайн архитектурной среды» АРХИД ТИУ. Член Союза архитекторов России



Матовников Григорий Сергеевич,

кандидат архитектуры. Доцент кафедры «Архитектурная физика» МАРХИ (ГА)



Костарева Анна Сергеевна,

магистр по направлению подготовки «Дизайн архитектурной среды» (2019, ТГАСУ). Архитектор

LG Innotek выпустила трёхмерный гибкий источник света для автомобилей

Компания LG Innotek объявила о запуске в производство трёхмерного гибкого ИС для автомобилей «Nexlide-HD», который излучает яркий и равномерно распределённый свет с пяти поверхностей.



Компания поместила на тонкую подложку большое количество СД, формирующих автомобильный осветительный модуль. Этот модуль представляет собой гексаэдр, который плавно изгибается, как резина, и устанавливается в наружных огнях, таких как дневные ходовые огни и габаритные задние фонари.

«Nexlide-HD»:

- излучает равномерно распределённый свет с пяти поверхностей, не включающих в себя контактную поверхность подложки. Компания использовала корпусированные СД, светящие в пределах полупространства, и соответствующую оптическую систему;

- обеспечивает уникальную возможность формирования ИС самой разной формы: например, в виде прямой или изогнутой линии, волны или трёхмерной фигуры. Модуль можно разрезать на тонкие части для формирования цветочного рисунка или чего-то иного. Гибкость модуля позволяет придавать ему разную форму с помощью силикона.

Это изделие может использоваться как в габаритных задних фонарях, так и в дневных ходовых огнях, устанавливаемых в передней части автомобиля. Для дневных ходовых огней требуется сила света 400 кд и выше, чтобы их можно было заметить даже в дневное время.

LG Innotek увеличила максимальную силу света модуля с помощью некоторой 5-гранной стереоскопической конструкции. Кроме того, «Nexlide-HD» можно использовать для создания тонких ИС и возможности уменьшения толщины автомобильных огней без малого на 70 %.

ledinside.com
30.08.2019

Реализация лабораторного образца настраиваемого многоцветного источника света¹

Н. КАРЛИ¹, А. СПЕРЛИНГ², Г. БИЗЯК^{1,3}

¹ Люблянский университет, Любляна, Словения

² Национальный физико-технический институт, Брауншвейг, Германия

³ E-mail: grega.bizjak@fe.uni-lj.si

Аннотация

В Национальном физико-техническом институте, Германия, был сконструирован и изготовлен настраиваемый многоцветный источник света (НМИС) (*tunable colour light source*). Он состоит из интегрирующей сферы с 24-мя СД, питающимися от управляемого компьютером источника питания. НМИС предназначен для формирования любого спектра видимого излучения и позволяет минимизировать количество источников света, используемых в лабораториях для проведения калибровки. Благодаря наличию встроенного спектрометра была реализована обратная связь, позволяющая улучшить характеристики НМИС и стабилизировать спектральное распределение генерируемого им излучения. Перед тем, как перейти к практической реализации НМИС, был проведён ряд исследований, позволяющих спрогнозировать его работу и возможности на примере нескольких выбранных спектров. В ходе практической реализации НМИС возникли некоторые трудности, в частности, связанные с оптимизацией спектра генерируемого излучения, зависимостью спектра СД от протекающего через СД тока и от температуры СД, нелинейной зависимостью светового потока СД от протекающего через него тока, а также с проблемами, возникающими при малых значениях весовых коэффициентов (*synthesis coefficient*).

Ключевые слова: СД, настраиваемый многоцветный источник света, спектральное распределение энергии излучения, *LabVIEW*.

1. Введение

Настраиваемые многоцветные источники света (НМИС) могут ис-

пользоваться в разных областях применения, исключая общее освещение и включая проведение калибровки в лабораториях. Фактически, НМИС представляют собой многоканальные источники света, в которых в настоящее время используются преимущественно комплекты светодиодов (СД), позволяющие воспроизводить различные спектральные распределения энергии излучения (СРЭИ). Некоторые настраиваемые источники света, включающие в себя разное количество СД и имеющие регулируемые спектры излучения, уже имеются в продаже и могут использоваться для освещения, при проведении химических исследований и в индустрии развлечений. Те из них, которые предназначены для общего освещения, часто способны генерировать белый свет с различной коррелированной цветовой температурой (КЦТ) [1] и состоят из от двух до четырёх разных СД. Многоканальные СД источники света используются также при проведении различных химических опытов и измерений. Они обычно содержат от четырёх до восьми разных монохроматических СД, у которых пиковые длины волн распределены в пределах видимой области спектра. Для освещения также используются многоканальные источники света (с узкими пучками лучей) с одноцветными и белыми СД. По сравнению с НМИС, предназначенными для использования в лабораториях и для калибровки фотометрических приборов, эти устройства часто содержат меньшее количество разных СД и не включают в себя спектрометры, позволяющие в реальном масштабе времени измерять спектр генерируемого излучения. Измерение генерируемого спектра и работа «с обратной связью» обеспечивают возможность регулировать и стабилизировать спектр излучения предназначенного для проведения калибровок НМИС, что име-

ет решающее значение для используемых для калибровки источников света. Идеальный калибровочный НМИС должен обладать способностью воспроизводить СРЭИ любого источника света для последующей калибровки фотометрического измерительного оборудования.

Важно значение имеет то обстоятельство, что калибровочный НМИС может генерировать излучение с различными СРЭИ и заданными фотометрическими и колориметрическими характеристиками, такими как яркость, КЦТ, координаты цветности (x , y) и индекс цветопередачи. Реализация СРЭИ различных иллюминантов при помощи одного-единственного источника света значительно облегчает и удешевляет калибровку оборудования применительно к различным СРЭИ. Помимо воспроизведения СРЭИ реальных источников света, калибровочный НМИС позволяет реализовывать иллюминанты, которые описаны только теоретически.

Калибровочный НМИС, основанный на использовании интегрирующей сферы с 24-мя входными отверстиями для СД, был разработан в Национальном физико-техническом институте, Германия. Изготовленный калибровочный НМИС предназначен, главным образом, для калибровки различных приборов и измерительного оборудования применительно к разным спектрам [2]. В статье описана программа, используемая для управления калибровочным НМИС, и проблемы, с которыми пришлось столкнуться в процессе разработки. Большая часть этих проблем связана с практическим применением разработанного метода оптимизации и характеристиками реальных СД, которые не являются линейными функциями времени и электрического тока. В статье также описана работа разработанного калибровочного НМИС.

2. Управление генерируемым спектром

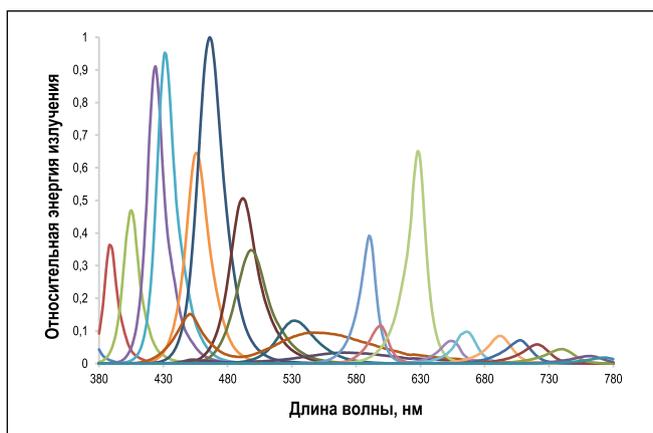
Задачей калибровочного НМИС с большим количеством СД является формирование любого заданного спектра. В основу калибровочного НМИС положена интегрирующая сфера с многочисленными входными отверстиями, предназначенными для СД и формирующими окружность вокруг выходного отверстия сферы (рис. 1).

¹ Перевод с англ. Е.И. Розовского

Рис. 1. Калибровочный НМИС. Слева: интегрирующая сфера с СД, установленными вокруг выходного отверстия. Справа: 24-канальный источник питания постоянного тока



Рис. 2. Спектры 22-х монохроматических и 2-х белых СД, использовавшихся в калибровочном НМИС, которые были измерены управляющей программой НМИС при номинальных значениях токов. Спектры нормированы применительно к максимуму СРЭИ наиболее мощного СД



Так как СД экранированы и освещают только заднюю поверхность сферы, то прямой свет СД не может выходить за пределы сферы. СД подключены к многоканальному источнику постоянного тока, причём каждый отдельный СД или каждая группа одинаковых СД подключены к одному из каналов. Источник постоянного тока подключён к управляющему персональному компьютеру через универсальную интерфейсную шину, позволяющую контролировать каждый из каналов в отдельности. Окружающее выходное отверстие интегральной сферы кольцо СД заканчивается входным устройством волоконно-оптического кабеля спектрометра. При этом используемый спектрометр подключён к управляющему персональному компьютеру через USB. Калибровочный НМИС управляется программой, написанной в среде LabVIEW™.

Так как калибровочный НМИС задуман как источник света с регулируемым спектром, то очень важно, чтобы ток каждого из СД устанавливался индивидуально. Внутренние коэффициенты использования (*internal output coefficient*) K_i , где i – номер конкрет-

ного СД, используются управляющей программой для описания индивидуальных настроек, исходя при этом из отношения светового потока СД при заданном значении тока к световому потоку этого же СД при номинальном значении тока. K_i могут изменяться в диапазоне от 0 до 1. Это позволяет описать вклад каждого из СД в полный световой поток калибровочного НМИС.

Алгоритм расчёта 24-х K_i , обеспечивающих формирование желательного синтезированного спектра, состоит из нескольких шагов. Целью программы является по возможности наиболее близкая подгонка генерируемого спектра, который измеряется самим НМИС, к желательному спектру. На первом шаге желательный спектр загружают в программу, в качестве «целевого», и программа старается сформировать наиболее приближённый к нему спектр при помощи измеренных заранее спектров СД, установленных в калибровочном НМИС. Так как полный световой поток калибровочного НМИС должен быть регулируемым, так чтобы обеспечить на выходе НМИС желательную яркость без изменения формы спектра, то желатель-

ный спектр нормируется. Управляющая программа обеспечивает возможность задать количество СД, которое должно быть использовано для синтеза желательного спектра, и их номинальные токи. На основе известного желательного спектра и измеренных заранее спектров отдельных СД, рассчитываются весовые коэффициенты, позволяющие по возможности наилучшим образом приблизить синтезированный спектр к желательному.

Чтобы обеспечить возможность создания источника света с любым желательным СРЭИ, калибровочный НМИС был снабжён 22-мя монохроматическими СД и двумя дополнительными белыми СД (тёпло-белого и холодно-белого света), спектры которых приведены на рис. 2. Эти СД были выбраны таким образом, чтобы их СРЭИ были равномерно распределены по всей видимой части спектра, от 380 до 780 нм. Такое распределение позволяет синтезировать непрерывный спектр генерируемого НМИС излучения.

СД тёпло-белого и холодно-белого света были включены в набор из-за отсутствия СД с пиковой длиной волны в области 550 нм. Пиковые длины волн СД и соответствующие им относительные амплитуды излучения приведены в таблице, где СД тёпло-белого и холодно-белого света присвоены, соответственно, номера 23 и 24. Относительные амплитуды излучения приведены в таблице для лучшего понимания различий в потоках излучения используемых СД. Спектры СД приведены к спектру СД с максимальным потоком излучения. Так как СД с пиковыми длинами волн в диапазоне от 650 до 780 нм имеют более слабые по сравнению с другими СД потоки излучения, то при синтезировании спектров с большими длинноволновыми составляющими (красная часть видимого спектра) полный световой поток калибровочного НМИС может оказаться очень низким.

3. Метод оптимизации

В данном случае, процесс оптимизации – это автоматизированный процесс управления выбранным набором СД в целях получения идеального для синтеза желательного спектра сочетания как самих СД, так и их токов питания. Совокупный (синтезированный) спектр 24-х СД оптимизи-

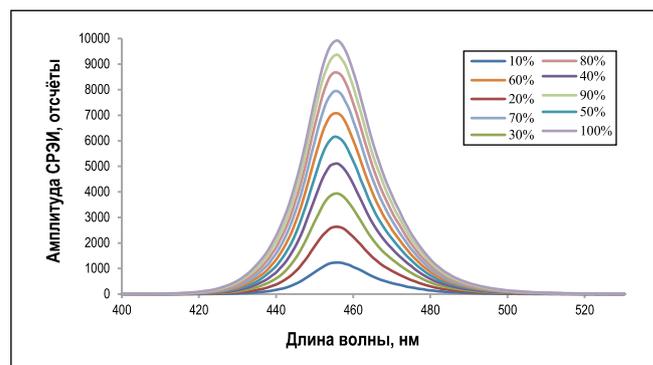
руется таким образом, чтобы спектр излучения, выходящего из выходного отверстия интегрирующей сферы, был по возможности наиболее близок к желательному. Критерий оптимизации основан на сумме рассчитываемых с интервалом 1 нм квадратов разностей спектральных характеристик калибровочного НМИС и желательного излучения (метод наименьших квадратов). Так называемая погрешность синтеза (*synthesis error*) S_{err} рассчитывается по формуле:

$$S_{err} = \int (b(\lambda) - a(\lambda))^2 d\lambda, \quad (1)$$

где $a(\lambda)$ – измеренный спектр калибровочного НМИС, а $b(\lambda)$ – желательный спектр. Кроме того, значение S_{err} позволяет судить о качестве подгонки спектра калибровочного НМИС к желательному СРЭИ.

Имеется большое количество публикаций, посвящённых исследованиям различных НМИС, в которых используются СД, и тому, как подогнать синтезированный спектр по возможности наиболее близко к желательному. Для удовлетворения упомянутого условия можно воспользоваться двумя подходами, а именно, методом последовательных приближений или методом аппроксимации. В [3] был предложен настраиваемый СД источник света, в котором оптимизация (подгонка) спектра осуществлялась при помощи простого, но медленного метода последовательных приближений, тогда как в [4] было предложено использовать метод отсечки (*pruning process*), в рамках которого оптимизация осуществлялась посредством удаления отдельных СД с целью получения их оптимального набора. Большинство описанных в статьях методов основаны на методе оптимизации Гаусса, который используется для решения нелинейных задач посредством минимизации суммы квадратов разностей значений функций. В рассматриваемом случае мы также воспользовались оптимизацией Гаусса для минимизации суммы квадратов разностей измеренных спектральных характеристик калибровочного НМИС и желательного излучения, так как это приводит к минимальному расхождению между этими двумя спектрами. Весовые коэффициенты K_i , которые рассчитываются в процессе оптимизации, в совокупности описывают синтезированный спектр, который наиболее близок

Рис. 3. Зависимость амплитуды СРЭИ СД от тока. В поле рисунка приведены значения токов, выраженные в % от номинального тока, при котором измерялось СРЭИ СД, имеющего постоянный цвет



к желательному. К сожалению, в базовом методе оптимизации Гаусса часть коэффициентов K_i могут оказаться отрицательными. А так как весовые коэффициенты K_i соответствуют световым потокам СД, которые не могут быть отрицательными, то синтезированный спектр излучения не может быть реализован с использованием отрицательных коэффициентов. Поэтому нужен метод, в котором помимо требования минимизации суммы квадратов разностей спектральных характеристик присутствовали бы и другие ограничения, а именно, то, что рассчитанные значения всех коэффициентов K_i должны быть положительными или равными нулю. В [5] приведён алгоритм неотрицательного метода наименьших квадратов (*NNLS*), который оказался оптимальным методом решения неотрицательной задачи с ограничениями в виде неравенств. В [6] был предложен быстрый алгоритм метода наименьших квадратов с ограничениями, исключающими использование отрицательных коэффициентов, в основу которого был положен стандартный алгоритм этого типа [5], тогда как в [7] сообщили о наличии в свободном доступе написанной на языке Си программы для решения разреженной задачи наименьших квадратов с ограничениями (*sparse constrained least-squares problem*).

Из-за того, что в данном случае приемлемыми являются только положительные (или равные нулю) решения задачи оптимизации Гаусса, то нами был опробован метод *NNLS*, в котором принимается во внимание условие неотрицательности весовых коэффициентов. Вначале мы опробовали не только *NNLS*, но и несколько других методов, воспользовавшись при этом измеренными спектрами СД, входящих в состав калибровочного НМИС. Так как для всех рассмотренных желательных спектров наилучшие резуль-

таты были получены в случае метода *NNLS*, то было решено реализовать его в среде *LabVIEW™*, использовавшейся для управления калибровочным НМИС.

Основанный на *NNLS* метод оптимизации описывается следующим образом:

- Минимизируйте $\|Ax - b\|$ при условии $x \geq 0$, где A – матрица размером $m \times n$, $m \geq n$, b – составляющая m вектора данных, а x – составляющая n вектора решения. Следует найти матрицу A , которая была бы решением уравнения $Ax \approx b$, где $x \geq 0$. Элементами матрицы A служат компоненты выбранных СРЭИ измеренных СД, причём n – это количество СД, а $m = 401$ – размерность выбранного вектора СРЭИ, измеренного с шагом 1 нм в диапазоне длин волн от 380 до 780 нм. Желательный спектр отображён вектором b , имеющим ту же размерность $m = 401$, что и у матрицы A .

В [5] был описан алгоритм, состоящий из 9-ти шагов. Процесс начинается с приравнивания всех составляющих вектора x к нулю, создания множества Z , содержащего все индексы, и пустого множества P . В основном цикле проводятся расчёт градиентного вектора w , используя при этом текущее значение x :

$$w = A^T (b - Ax). \quad (2)$$

Если Z представляет собой пустое множество или если все составляющие вектора w , индексы которых присутствуют в Z , имеют значения ≤ 0 , то решение найдено, и процесс завершается. В ином случае, на следующем шаге максимальную составляющую вектора w переносят из Z в P . Если хотя одна из составляющих имеет отрицательное значение, то в качестве пробного решения может быть принята только часть Z . Поэтому на сле-

Рис. 4. Пример СД, у которого амплитуда СРЭИ и пиковая длина волны зависят от тока. В поле рисунка приведены значения токов, выраженные в % от номинального тока, при котором измерялось СРЭИ. Штриховая красная линия демонстрирует смещение пиковой длины волны

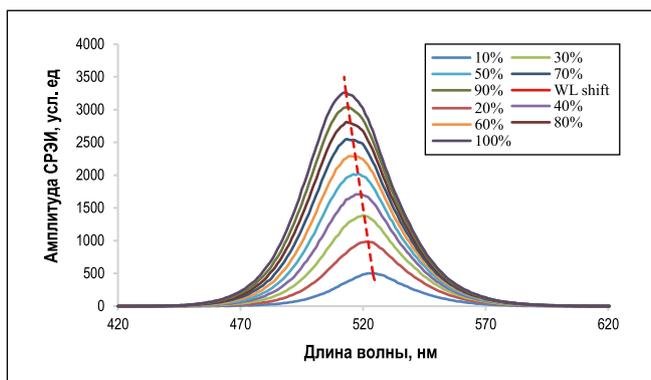
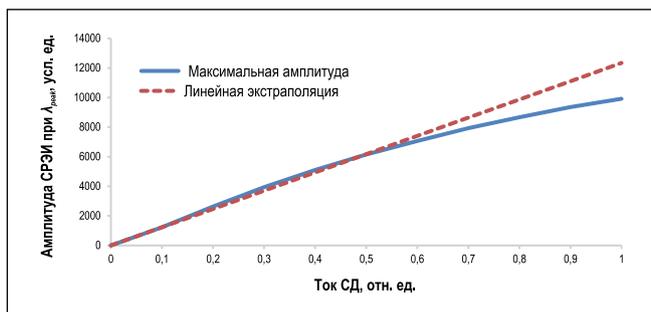


Рис. 5. Зависимость амплитуды СРЭИ от тока СД (синяя кривая). Пунктирная красная линия соответствует линейной экстраполяции начального участка линейного участка, соответствующая токам, меньшим чем 10 % от номинального тока СД



дующем шаге требуется найти индекс q , такой, чтобы величина

$$\frac{x_q}{(x_q - z_q)} \quad (3)$$

оказалась наименьшей из всех подобных величин, полученных применительно к отрицательным элементам Z . При помощи соответствующего этому q значения α можно записать линейную сумму

$$x = x + \alpha(z - x). \quad (4)$$

На последнем шаге все индексы, соответствующие которым составляющие вектора x равны нулю, переносят из Z в P^2 . Это относится к x_q , но может охватывать и другие составляющие. По завершении процесса множество P описывает вектор весовых коэффициентов. Более подробно этот процесс описан в [8, 9].

4. Проблемы, связанные с практической реализацией НМИС

Основной вопрос, который возникает при практической реализации калибровочного НМИС в целом и программы оптимизации в частности, состоит

в том, как определяемую оптимизирующим коэффициентом K_i часть светового потока реализовать за счёт изменения питающего СД тока. В реализованном методе *NNLS* для расчёта K_i используются измеренные спектры СД. Каждый из K_i определяет требуемую часть светового потока соответствующего СД, измеренного при номинальном значении тока. К сожалению, световой поток, как правило, нелинейно зависит от протекающего через СД тока, так что K_i нельзя непосредственно использовать для расчёта соотношения между током СД и его номинальным значением. Для правильного определения тока СД следует принимать во внимание зависимость СРЭИ СД от тока. Пример такой зависимости приведён на рис. 3.

Изменение тока СД влияет также и на температуру p - n -перехода, что приводит к изменению СРЭИ СД. Это изменение СРЭИ выражается в зависимости от тока смещении пиковой длины волны и соответствующем изменении цвета генерируемого света. Однако, так как в случае калибровочного НМИС были зарегистрированы только очень небольшие смещения пиковых длин волн используемых СД, то в программу оптимизации не была включена подпрограмма, которая позволяла бы учесть подобные смещения. Вместо этого в программу *LabVIEWTM* была внесена дополнительная программа управления с обратной связью,

которая не только поддерживает стабильность генерируемого НМИС излучения, но и может устранить относительно небольшое влияние смещения пиковых длин волн СД на спектр этого излучения. В будущем, если используемые СД будут заменены на СД большей мощности, у которых смещения пиковых длин волн оказываются более существенными, то потребуются ввести программу, позволяющую учесть эти смещения. Пример смещения пиковой длины волны СД приведён на рис. 4.

Для того чтобы определить зависимость светового потока СД от тока, требуется провести несколько измерений СРЭИ СД. Управляющая программа калибровочного НМИС использует результаты 10-ти измерений каждого из СД, проведённых при разных токах, в диапазоне от 10 до 100 % от номинального (I_{max}) с шагом 10 %. Программа начинает с первого СД, ток которого устанавливается равным 10 % от I_{max} , а затем переходит ко второму СД, потом к третьему и т.д. После измерения последнего СД ток увеличивается на 10 %. Программа осуществляет 9 увеличений тока, тем самым по 10 раз измеряя СРЭИ каждого из СД.

Если использовать соответствующую пиковой длине волны амплитуду СРЭИ в качестве меры светового потока СД, то её зависимость от тока СД будет выглядеть так, как это показано на рис. 5. Для включения этой зависимости в управляющую программу калибровочного НМИС её следует описать математически. Было установлено, что зависимость светового потока от тока можно аппроксимировать кривой, описываемой полиномом. В большинстве случаев, измеренную зависимость можно с достаточной точностью аппроксимировать полиномом 3-го порядка.

При помощи такой, как показанная на рис. 5, измеренной зависимости светового потока от тока СД, на основе значений весовых коэффициентов K_i , которые были рассчитаны программой оптимизации применительно к желательному спектру, можно для каждого из СД определить значение тока, обеспечивающего требуемую величину светового потока этого СД. Однако перед внесением поправок в коэффициенты K_i , следует проверить, достаточно ли велики значения K_i , чтобы обеспечить получение оптимального светового потока кали-

² В [8] и, соответственно, в [9] была допущена опечатка: вместо «из Z в P » было «из P в Z ». — Прим. пер.

бровочного НМИС. Весовые коэффициенты K_i определяют световые потоки СД, причём равное 1 значение коэффициента соответствует световому потоку, генерируемому рассматриваемым СД при номинальном значении тока. Если коэффициент окажется слишком маленьким, то есть не превышающим величину, лежащую в диапазоне от 0,05 до 0,1, то СД обычно не включится из-за слишком малого прямого напряжения. Чтобы избежать получения таких малых значений коэффициентов и обеспечить оптимальный световой поток калибровочного НМИС, все СД нормируются применительно к тому СД, который имеет наибольший световой поток из всей совокупности световых потоков СД, обеспечивающих получение желательного СРЭИ. Ток СД с наибольшим весовым коэффициентом K_i устанавливается равным номинальному с соответствующим увеличением токов остальных СД. Одновременно соответствующим образом масштабируется и желательное СРЭИ, что позволяет сравнить желательный и синтезированный спектры. Если некоторые из весовых коэффициентов K_i окажутся меньше, чем требуется для включения соответствующих СД, то эти СД исключают из набора, используемого для получения рассматриваемого желательного спектра, и процесс оптимизации запускают по новой для получения нового наилучшего приближения без использования исключённых СД.

Из-за колебаний температуры и старения СД, генерируемое калибровочным НМИС излучение, а именно, СРЭИ НМИС в целом и входящих в него СД в частности, может изменяться во времени. Для уменьшения упомянутых эффектов, в управляющую программу был введён дополнительный алгоритм. Это простая итерационная программа оптимизации, которая старается минимизировать погрешность синтеза S_{err} за счёт небольших изменений токов всех СД. Благодаря этому алгоритму излучение калибровочного НМИС остаётся стабильным, причём оказалось, что в ряде случаев S_{err} становится даже чуть лучше (уменьшается). Причиной этого служит, главным образом, возможность осуществления обратной связи с использованием встроенного спектрометра, что является главным преимуществом описываемого

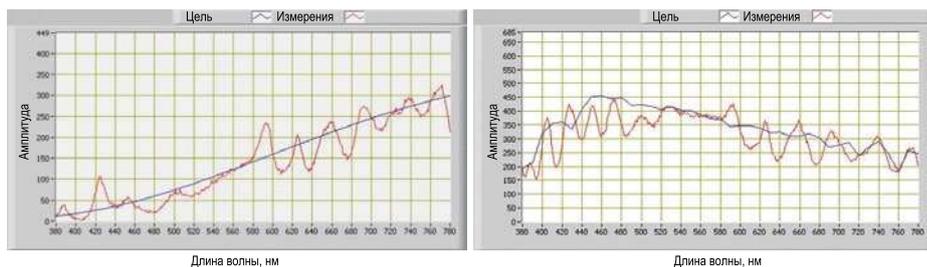


Рис. 6. Желательный спектр (синяя линия) и оптимизированный спектр выходящего излучения (красная линия) при воспроизведении иллюминантов А (слева) и D65 (справа)

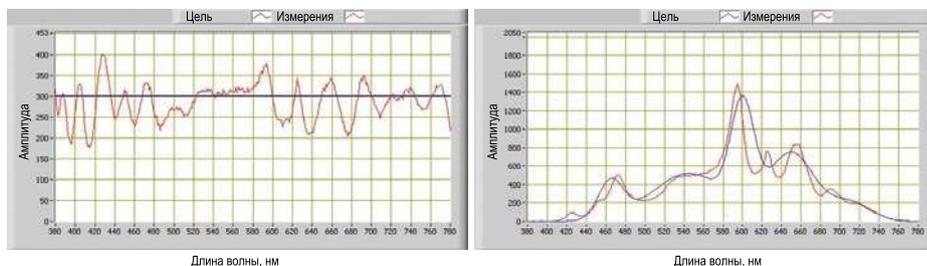


Рис. 7. Желательный спектр (синяя линия) и оптимизированный спектр выходящего излучения (красная линия) при воспроизведении спектров EE05 (слева) и ОСД (справа)

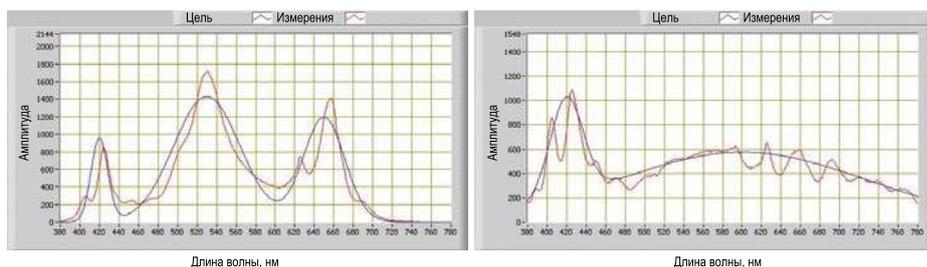


Рис. 8. Желательный спектр (синяя линия) и оптимизированный спектр выходящего излучения (красная линия) при воспроизведении спектров RGB СД (слева) и белого СД (справа)

го НМИС перед прочими имеющимися в продаже НМИС. На первом шаге этот дополнительный алгоритм обратной связи поочередно увеличивает токи СД на заданную величину (1–5 % от номинального тока). Размер приращения может быть задан в управляющей программе. После увеличения тока одного из СД, встроенный спектрометр измеряет полученный спектр, после чего повторно рассчитывается погрешность синтеза S_{err} . Если полученное значение S_{err} окажется более хорошим, то изменение тока этого СД сохраняется и впредь. Если же S_{err} ухудшится, то восстанавливается прежнее значение тока. Затем алгоритм обратной связи переходит к следующему СД. После проверки всех СД, алгоритм обратной связи снова начинает с первого СД, пытаясь улучшить S_{err} . Если на предыдущем этапе увеличение тока не привело к улучшению S_{err} , то на следующем этапе обратной связи токи СД будут уменьшены на заданную вели-

чину. Таким образом, небольшие изменения токов СД будут реализованы как в одну, так и в другую сторону, с тем, чтобы улучшить сходство между СРЭИ калибровочного НМИС и желательным спектром и сохранить стабильность калибровочного НМИС даже при небольших изменениях условий эксплуатации и характеристик отдельных СД.

Таким образом, управляющая программа разработанного калибровочного НМИС состоит из трёх подпрограмм. После запуска управляющей программы, происходит загрузка желательного спектра и запрашиваются номинальные значения токов установленных СД. Затем первая подпрограмма определяет зависимости световых потоков всех СД от тока. Она начинается с 10 % от номинальных токов установленных СД и с шагом 10 % доходит до уровня 100 %. После измерения всех СД, запускается алгоритм оптимизации второй подпрограммы и рассчитываются значения весовых

Пиковые длины волн и относительные мощности пиков излучения 24-х отобранных СД

СД	Пиковая длина волн, нм	Относительная мощность пика	СД	Пиковая длина волн, нм	Относительная мощность пика
1	380	0,042	13	599	0,116
2	388	0,361	14	628	0,648
3	405	0,463	15	654	0,069
4	424	0,900	16	666	0,099
5	431	0,943	17	692	0,086
6	456	0,645	18	707	0,071
7	466	1	19	721	0,058
8	492	0,500	20	739	0,044
9	498	0,341	21	762	0,023
10	513	0,213	22	774	0,018
11	531	0,131	23 (тёпло-белый)	572	0,0339
12	590	0,390	24 (холодно-белый)	451	0,1516

коэффициентов K_i , которые определяют собой требуемые токи СД и позволяют синтезировать желательный спектр. В конце процесса оптимизации рассчитанные весовые коэффициенты пропорционально увеличивают, так чтобы наибольший из них стал равен 100 %. Это делается для обеспечения наибольшей возможной для желательного спектра яркости выходного отверстия калибровочного НМИС. В конце этой подпрограммы весовые коэффициенты преобразуются в требуемые токи СД, для чего используются измеренные ранее зависимости светового потока от тока. И наконец, каналы питания калибровочного НМИС настраивают на соответствующие значения тока и включают. После прогрева, требующегося для стабилизации выходных характеристик СД, запускается третья подпрограмма с обратной связью, обеспечивающая непрерывное измерение генерируемого СРЭИ и старающаяся улучшить подгонку к желательному спектру посредством небольших изменений токов каждого отдельного СД, как это описано выше.

5. Результаты

Калибровочный НМИС предназначен для повторения любого СРЭИ в ограниченном диапазоне длин волн от 380 до 780 нм. Подгонка СРЭИ, генерируемого совокупностью большого количества СД, к желательному СРЭИ осуществляется при помощи метода оптимизации, который был описан в разделе 3. Из-за нелинейно-

сти характеристик СД, рассчитанные весовые коэффициенты должны быть скорректированы для преобразования их в требуемые токи СД. Для того чтобы это можно было сделать при помощи математических алгоритмов, следует провести многочисленные измерения СРЭИ СД, что увеличивает продолжительность процесса в целом. Для уменьшения продолжительности подготовительной стадии, все измеренные СРЭИ могут быть сохранены в памяти для последующего использования, т.е. для синтезирования других спектров. Получающееся в результате СРЭИ калибровочного НМИС может отличаться от заданного желательного СРЭИ как из-за особенностей процесса оптимизации, так и из-за ограниченности количества используемых в НМИС СД и их пиковых длин волн, а также из-за изменения их радиометрических характеристик под влиянием изменений температуры, старения и т.д.

При наличии программы и измеренных при разных значениях тока и сохранённых СРЭИ СД, калибровочный НМИС практически мгновенно формирует на выходе интегрирующей сферы оптимизированное СРЭИ. Благодаря обратной связи по спектру, в основе которой лежат осуществляемые при помощи спектрометра периодические измерения СРЭИ на выходе НМИС, сформированный спектр остаётся неизменным на всём протяжении работы НМИС. Основным достоинством использования встроенного спектрометра

и осуществляемых в реальном масштабе времени периодических измерений является возможность и вариативность замены одного или нескольких СД без проведения каких бы то ни было дополнительных расчётов или внесения изменений в написанную в *LabVIEWTM* управляющую программу. Весь процесс в целом, начиная с измерения СРЭИ установленным СД и заканчивая синтезированием и поддержанием выходного СРЭИ, осуществляется автоматически.

Для демонстрации качества синтезируемых спектров приведём несколько примеров реализации хорошо известных желательных спектров. На рис. 6–8 приведены результаты оптимизации и синтезирования, проведённых применительно к шести желательным спектрам, а именно, к спектру стандартного иллюминанта А МКО, стандартному спектру дневного света *D65* МКО, равноэнергетическому спектру (*EE 05*), типичному спектру излучения органического СД (ОСД), спектру *RGB* СД и спектру белого СД. В этих примерах использовался набор СД, описанный в разделе 2. Все спектры были измерены при помощи встроенного в НМИС спектрометра.

5. Заключение

Калибровочный НМИС разработан для обеспечения фотометрических лабораторий возможностью калибровки приборов и измерительного оборудования с использованием различных

спектров излучения. Помимо основной задачи, разработанный калибровочный НМИС может оказаться полезным при проведении исследований в области предназначенных для калибровки новых стандартных источников света МКО. Выбор метода *NNLS* для оптимизации генерируемого калибровочным НМИС спектра излучения оказался успешным и, несмотря на ограниченные количество и разнообразие типов использовавшихся СД, обеспечил малые расхождения между желательным спектром и спектром калибровочного НМИС. Благодаря наличию встроенного спектрорадиометра и использованию описанного в разделе 4 метода последовательных приближений, удалось дополнительно улучшить совпадение спектра НМИС с желательным спектром. Как следует из рис. 6–8, между этими спектрами всё ещё остаются заметные различия, которые в будущем можно будет устранить, используя большее количество СД в калибровочных НМИС следующего поколения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Zhong, P., He, G., Zhang, M.* Spectral optimization of the color temperature tunable white light-emitting diode (LED) cluster consisting of direct-emission blue and red LEDs and a diposphor conversion LED // *Optics Express.* – 2012. – Vol. 20, No. S5, – P. A684-A693.
2. *Bizjak, G., Lindemann, M., Sperling, A., Sauter, G.* Tunable LED colour source // *Proceedings of the CIE Expert Symposium on Spectral and Imaging Methods for Photometry and Radiometry, CIE, Vienna, 2010.*
3. *Fryc, I., Eppeldauer, G., Brown, S.W., Ohno, Y.* LED-based spectrally tunable source for radiometric, photometric and colorimetric applications // *Opt. Eng.* – 2005. – Vol. 44, No. 11.
4. *Wu, C.-C., Hu, N.-C., Fong, Y.-C., Hsiao, Y.-C., Hsiao, S.L.* Optimal pruning for selecting LEDs to synthesize tunable illumination spectra // *Light. Res. Technol.* – 2012 – Vol. 44, No. 4. – P. 484–497..
5. *Lawson, C. L., R.J. Hanson, R.J.* Solving least squares problems. Chapter 23. Linear Least squares with linear inequality constraints // *Society for industrial and applied mathematics, 1995.*
6. *Bro, R., Jong, S.D.* A fast non-negativity-constrained least squares algorithm // *Journal of Chemometrics.* 1997. – Vol. 11, No. 5. – P. 393–401.
7. *Cantarella, J., Piatek, M.* Tsnpls: A solver for large sparse least squares problems with non-negative variables // *Computing Research Repository CoRR, 2004.*
8. *Carli, N., Sperling, A., Bizjak, G.* Optimization methods for spectral synthesizing of a tune-

able colour light source // *Light & Engineering.* – 2018. – Vol. 26, No. 3. – P. 99–108.

9. *Карли Н, Сперлинг А., Бизяк Г.* Методы оптимизации синтезирования спектров настраиваемых многоцветных источников света // *Светотехника.* – 2018. – № 3. – С. 24–31.

10³. Routine «Solve nonnegative least-squares constrains problem – lsqnonneg», MATLAB – Maths Works Deutschland, Available: <http://www.mathworks.com/help/matlab/ref/lsqnonneg.html?requestedDomain=www.mathworks.com>. [Accessed 2.11.2015].

11³. *Luo, M.R., Xu, L., Wang, H.* An LED based spectrum design for surgical lighting // *Proc. of 28th CIE Session, 2015.*

³ Ссылка на эту работу в тексте статьи отсутствует. – Прим. пер.



Нина Карли (Nina Carli). Окончила Люблянский университет, после чего стажировалась в Национальном физико-техническом институте, Германия, и в лаборатории освещения

и фотометрии электротехнического факультета Люблянского университета



Армин Сперлинг (Armin Sperling), Ph.D. (1994 г.). Руководитель отделения фотометрии и спектрометрии Национального физико-технического института, Германия. Заместитель руководителя

отделения 2 МКО, председатель Немецкого национального комитета МКО и член экспертного совета комитета по стандартизации в области света Немецкого института стандартов

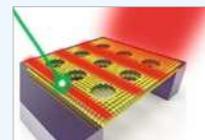


Грега Бизяк (Grega Bizjak), Ph.D. Профессор и руководитель лаборатории освещения и фотометрии электротехнического факультета Люблянского университета. Вице-президент

МКО, президент Словенского национального комитета МКО и представитель Словении в отделении 2 МКО. Область научных интересов: фотометрия, энергоэффективное внутреннее и наружное освещение, использование естественного света и использование СД для освещения

Создан самый тонкий световод – толщиной в три атома

Разработчики ряда оптических устройств стремятся делать их всё меньшими и меньшими. Их конечной целью является создание интегрированных фотонных кристаллов, размеры которых будут сопоставимы с размерами обычных кремниевых полупроводниковых кристаллов, что, в свою оче-



редь, должно привести к появлению вычислительных систем, обладающих высоким быстродействием, и устройств хранения информации, обеспечивающих высокую плотность записи.

Один из ключевых компонентов таких устройств – оптический волновод, световод, который играет ту же самую роль, что и токопроводящие дорожки или шины в обычной электронике. Но попытки миниатюризации этого компонента наталкиваются на ряд трудностей, связанных с ограничениями, накладываемыми законами физики.

Самые миниатюрные световоды, которые удавалось сделать до последнего времени, имеют толщину 200–300 нм. Однако исследователям из Калифорнийского университета в Сан-Диего удалось подобрать материал и изготовить из него работающий световод, состоящий из трёх атомарных слоёв, так что его толщина равна около 0,6 нм (т.е. более чем в 500 раз меньше, чем у световодов, используемых сейчас).

Ключевым моментом во всём этом деле стал материал из семейства переходных металлических дихалькогенидов – дисульфид вольфрама, одно из отличительных свойств которого – то, что даже в монослое этого материала при комнатной температуре формируются достаточно стабильные квазичастицы, состоящие из связанных электрона и электронной дырки, так называемые экситоны. В дополнение к этому, монослой дисульфида вольфрама способен проводить свет видимого диапазона, и этот материал стал первым в истории науки, при столь малой толщине обеспечивающим работу со светом видимого диапазона.

Учёным пока удалось изготовить лишь несколько образцов самых тонких световодов на сегодняшний день. Но после того, как будет разработана технология производства высококачественных плёнок дисульфида вольфрама в промышленных масштабах, световоды из этого материала быстро найдут практическое применение в коммерческих оптоэлектронных устройствах.

dailytechinfo.org/
28.08.2019

О зависимости уровня гармоник тока тепличных облучателей от уровня питающего напряжения

Н.П. КОНДРАТЬЕВА¹, Д.А. ФИЛАТОВ², П.В. ТЕРЕНТЬЕВ²

¹ Ижевская государственная сельскохозяйственная академия, Ижевск

² Нижегородская государственная сельскохозяйственная академия, Нижний Новгород

E-mail: filatov_da@inbox.ru

Аннотация

В статье показаны результаты исследования влияния уровня питающего напряжения на гармонический состав токов тепличных облучателей. Установлено, что его изменение влияет на уровень гармоник тока всех типов исследованных тепличных облучателей. При снижении номинального питающего напряжения на 10 % коэффициент нелинейного искажения по току THD_i снижается на 9 % для облучателей с лампами «ДНаЗ», на 10 % для облучателей с индукционными лампами и на 3 % для облучателей со светодиодами. При повышении номинального напряжения на 10 % THD_i повышается на 23 % для облучателей с лампами «ДНаЗ», на 10 % для облучателей с индукционными лампами и на 3 % для облучателей со светодиодами. Таким образом, наименьшее влияние изменение уровня питающего напряжения оказывает на уровень гармоник тока облучателей со светодиодами, а затем – облучателей с индукционными лампами. Наибольшее влияние изменение уровня питающего напряжения оказывает на уровень гармоник тока облучателей с лампами «ДНаЗ». Получены математические модели зависимости THD_i от уровня питающего напряжения для тепличных облучателей со светодиодами, с индукционными лампами и с лампами «ДНаЗ». Эти математические модели могут использоваться в расчётах полного тока при выборе трансформаторов и кабельных линий питания тепличных облучателей, при проектировании новых или реконструкции действующих систем облучения тепличных комбинатов и при расчётах потерь электроэнергии в электрических сетях тепличных комбинатов при технико-экономическом обосновании проектов по энергосбережению и повышению энергетической эффективности.

Ключевые слова: тепличные облучатели, питающее напряжение, общее гармоническое искажение по току.

Введение

Облучатели со светодиодами (СД) и с индукционными люминесцентными безэлектродными лампами (ИЛ), спектр излучения которых можно задавать комбинацией СД и составом люминофора соответственно, перспективны для тепличного овощеводства. При выращивании растений в светкультуре появляется возможность контроля и управления физиологическими процессами, протекающими в растениях. Анализ работ отечественных и зарубежных учёных [1–12] показал, что близкие данные по продуктивности растений могут получаться при использовании облучателей с СД и с ИЛ с красно-синим излучением при установленной мощности на 30–50 % меньшей, чем у облучателей с НЛВД для тепличных комбинатов и плодопитомников, используемых в настоящее время.

В связи с открывшимися перспективами, научный и практический интерес представляет взаимное влияние перспективных облучателей и систем электроснабжения в сравнении

с тем же для действующих облучателей с НЛВД. Тепличные облучатели – нелинейные электроприёмники, генерирующие высшие гармоники тока. Последние могут снижать качество функционирования всевозможных устройств и электроустановок или вызывать их повреждение, увеличивать дополнительные потери электроэнергии в электроприёмниках и электрических сетях [13]. Исследования качества электроэнергии, получаемой от централизованной электросети, показали, что на многих сельскохозяйственных предприятиях России диапазон уровня напряжения колеблется в широких пределах [14].

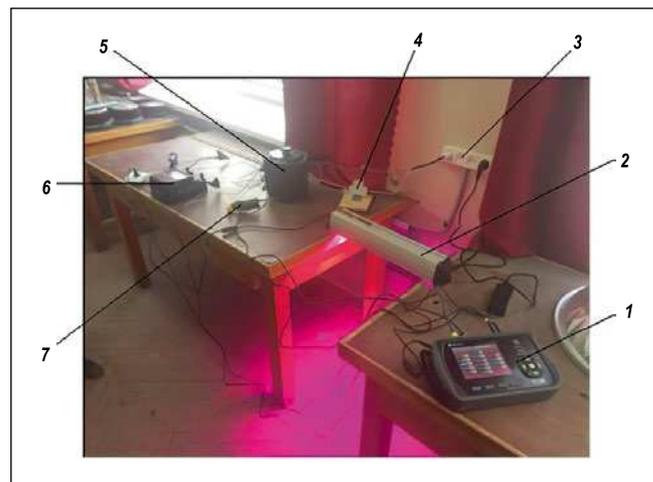
Цель работы – изучить влияние уровня питающего напряжения на гармонический состав токов тепличных облучателей.

Материалы и методы

Объектом исследования являются облучатели серии «ЖСП» с НЛВД с зеркальным отражателем (серия «ДНаЗ») производства ОАО «КЭТЗ», облучатели с СД серии «ДСО» производства ООО «ОКБ Луч» и облучатели с ИЛ фирмы S&O.

Внешний вид измерительного электротехнического комплекса показан на рис. 1. В состав этого комплекса входят: 1 – анализатор качества электроэнергии AR-6 фирмы Circutor, 2 – тепличный облучатель, 3 – источник питания ~ 220 В, 4 – автоматический выключатель, 5 – регулятор напряжения типа РНО-250–2-М, 6 – амперметр, 7 – токовые измерительные клещи на 5 А. Регулировка питающего напряжения для источника света осуществлялась линейным автотрансформатором. Показания электрических

Рис. 1. Электротехнический комплекс для измерения электрических параметров тепличных облучателей



параметров снимались анализатором качества электроэнергии. Измерения проводились на 2 источниках света каждого типа (по 3 измерения каждой точки). В течение первого часа после включения облучатели выходили на номинальный режим работы, измерения не проводились. Затем были проведены замеры гармонического состава токов облучателей в номинальном режиме. После этого проводились измерения уровня гармоник при изменении уровня питающего напряжения с шагом 2 В.

Результаты

Величину гармонического содержания сигнала переменного тока, включающего гармонический состав токов, характеризует, в частности, коэффициент нелинейных искажений по току THD_i ¹.

На рис. 2 показаны результаты исследований влияния уровня питающего напряжения (ПН) на THD_i тепличного облучателя «ЖСП» с лампой «ДНаЗ. При снижении номинального ПН на 10 % общее гармоническое искажение по току снижается на 9 %. При увеличении номинального ПН на 10 % общее гармоническое искажение по току увеличивается на 23 %.

На основании результатов исследований с помощью программы «MS Excel» получено математическое выражение изменения THD_i при изменении уровня ПН:

$$THD_i = THD_{i_{ном}} \cdot (1,6 \cdot K_U - 0,6),$$

$$R^2 = 0,9414,$$

где $THD_{i_{ном}}$ – номинальный THD_i , %; $K_U = U_{ф}/U_{ном}$ – изменение уровня ПН, о.е.; $U_{ф}$ – фактическое ПН, В; $U_{ном}$ – номинальное ПН, В; R^2 – коэффициент детерминации, о.е.

На рис. 3 показаны результаты исследований влияния уровня ПН на THD_i тепличного облучателей фирмы S&O, с ИЛ. При снижении номинального ПН на 10 % THD_i снижается на 10 %. При увеличении номинального ПН на 10 % THD_i увеличивается на 10 %.

¹ В иностранной литературе THD (Total Harmonic Distorsion) – коэффициент суммарных гармонических искажений.

Рис. 2. Зависимость THD_i от K_U для облучателя с лампой «ДНаЗ»

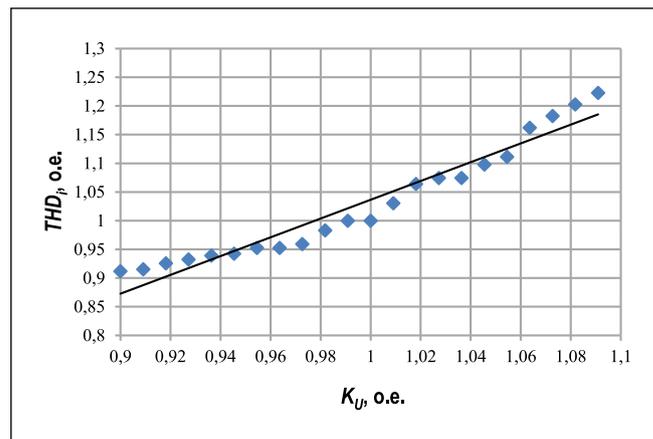


Рис. 3. Зависимость THD_i от K_U для облучателя с индукционной лампой

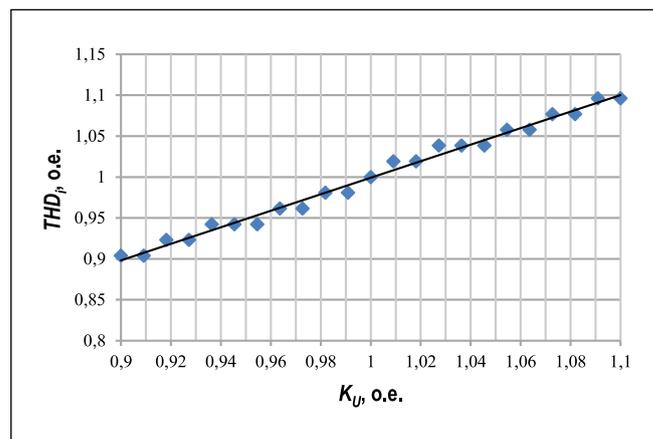
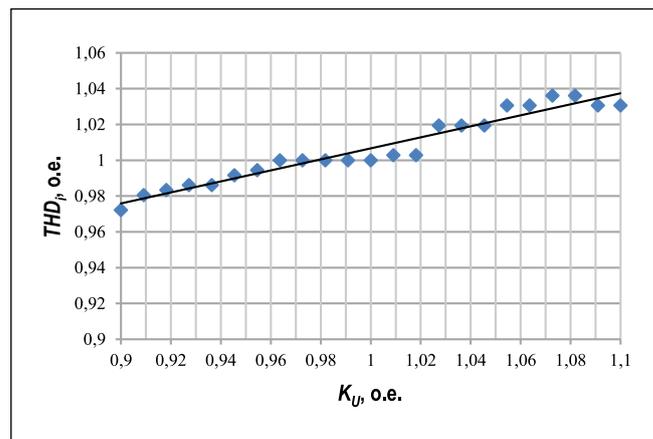


Рис. 4. Зависимость THD_i от K_U для облучателя со светодиодами



На основании результатов исследований с помощью программы «MS Excel» получено математическое выражение изменения THD_i при изменении уровня ПН:

$$THD_i = THD_{i_{ном}} \cdot K_U, R^2 = 0,9896.$$

На рис. 4 показаны результаты исследований влияния уровня ПН на THD_i тепличных облучателей «ДСО», с СД. При снижении номинального ПН на 10 % THD_i снижается на 3 %. При увеличении номинального ПН на 10 % THD_i увеличивается на 3 %.

На основании результатов исследований с помощью программы «MS Excel» получено математическое выражение изменения THD_i при изменении уровня ПН:

$$THD_i = THD_{i_{ном}} \cdot (0,3 \cdot K_U + 0,7),$$

$$R^2 = 0,9435.$$

Обсуждение

Изменение уровня ПН влияет на уровень гармоник тока всех типов исследуемых тепличных облучателей.

Так, при снижении номинального ПН на 10 % THD_i снижается на 9 % для облучателей с лампами «ДНаЗ», на 10 % для облучателей с ИЛ и на 3 % для облучателей с СД. При повышении номинального ПН на 10 % THD_i повышается на 23 % для облучателей с лампами «ДНаЗ», на 10 % для облучателей с ИЛ и на 3 % для облучателей с СД. Таким образом, наименьшее влияние изменение уровня ПН оказывает на уровень гармоник тока облучателей с СД и, затем, с ИЛ. Наибольшее влияние изменение уровня ПН оказывает на уровень гармоник тока облучателей с лампами «ДНаЗ».

Заключение

Получены математические модели зависимостей THD_i от уровня ПН для тепличных облучателей с СД, с ИЛ и с лампами «ДНаЗ», которые могут использоваться:

- в расчётах полного тока при выборе трансформаторов и кабельных линий питания тепличных облучателей и при проектировании новых или реконструкции действующих облучательных установок тепличных комбинатов;

- в расчётах потерь электроэнергии в электрических сетях тепличных комбинатов при технико-экономическом обосновании соответствующих проектов по энергосбережению и повышению энергетической эффективности.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Корепанов Д.А., Кондратьева Н.П., Чиркова Н.М.* Всхожесть семян клюквы болотной при использовании разных спектров фотосинтетической радиации // Вестник Ижевской государственной сельскохозяйственной академии.– 2012.– № 3 (32). – С. 82–83.
2. *Ракутько С.А., Ракутько Е.Н., Василькин А.Н.* Сравнительная оценка энергоэкологичности светокультуры салата (*Lactuca Sativa L.*) под натриевыми и индукционными лампами / Известия Санкт-Петербургского государственного аграрного университета. 2016. С. 331–338.
3. *Прикупец Л.Б., Емелин А.А., Тараканов И.Г.* Светодиодные фитооблучатели: из фитотрона в теплицу? / Теплицы России.– 2015.– № 2. – С. 52–56.
4. *Соколов А.В., Юферев Л.Ю.* Энергосберегающая система освещения для защищённого грунта // Инновации в сель-

ском хозяйстве.– 2014.– № 4(9). – С. 76–69.

5. *Johkan M., Shoji K., Goto F., Hahida S., Yoshihara T.* Effect of green light wavelength and intensity on photomorphogenesis and photosynthesis in *Lactuca sativa*. *Environmental and Experimental Botany.*– 2012. – Vol. 75. – P. 128–133.

6. *Fan X.X., Xu Z.G., Liu X.Y., Tang C.M., Wang L.W., Han X.L.* Effects of light intensity on the growth and leaf development of young tomato plants grown under a combination of red and blue light. *Scientia Horticulturae.*– 2013. – Vol. 153. – P. 50–55.

7. *Lin K.H., Huang M.Y., Huang W.D., Hsu M.H., Yang Z.W., Yang C.M.* 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. *Pardo G.P., Aguilar C.H., Martinez F.R., Canseco M.M.* Effects of light emitting diode high intensity on growth of lettuce (*Lactuca sativa L.*) and broccoli (*Brassica oleracea L.*) seedlings // *Annual Research & Review in Biology.*– 2014. – Vol. 19. – P. 2983–2994.

9. *Sase S., Mito C., Okushima L., Fukuda N., Kanesaka N., Sekiguchi K., Odawara N.* Effect of overnight supplemental lighting with different spectral LEDs on the growth of some leafy vegetables // *Acta Horticulturae.*– 2012. – Vol. 956. – P. 327–333.

10. *Lee J.S., Lim T.G., Kim Y.H.* Growth and phytochemicals in lettuce as affected by different ratios of blue to red radiation / *Acta Horticulturae.*– 2014. – Vol. 1037. – P. 843–848.

11. *Muneer S., Kim E.J., Park J.S., Lee J.H.* Influence of green, red and blue light emitting diodes on multiprotein complex proteins and photosynthetic activity under different light intensities in lettuce leaves (*Lactuca sativa L.*). *International journal of molecular sciences.*– 2014. – Vol.15. – P. 4657–4670.

12. Отчёт по испытаниям ламп ДНаТ-400 и индукционных люминесцентных ламп 250W M-S и Bi-S. URL: <http://growlife.ru/otchet-po-ispytaniyu-lamp-dnat-400-i-indukcionnyh-lyuminescentnyh-lamp-250w-m-s-i-bi-s> (дата обращения: 23.02.2019).

13. *Кондратьева Н.П., Терентьев П.В., Филатов Д.А.* Сравнительный экспериментальный анализ по электромагнитной совместимости разрядных и светодиодных искусственных источников света для растениеводства // Вестник НГИЭИ.– 2018.– № 12 (91). – С. 39–49.

14. *Филатов Д.А., Терентьев П.В.* Электромагнитная совместимость сис-

тем электроснабжения и электрооборудования сельскохозяйственных предприятий при изменении уровня питающего напряжения // Вестник Нижегородской государственной сельскохозяйственной академии.– 2016.– № 3 (11). – С. 57–62.



Кондратьева Надежда Петровна, доктор техн. наук, профессор. Окончила в 1978 г. Челябинский институт механизации и электрификации сельского хозяйства.

Зав. кафедрой «Автоматизированный электропривод» Ижевской государственной сельскохозяйственной академии (ИжГСХА). Имеет свою научную школу в области сельскохозяйственной светотехники и занимается разработкой энергосберегающих световых технологий для предприятий АПК. Имеет звание «Почётный работник высшего профессионального образования Российской Федерации»



Филатов Дмитрий Алексеевич, кандидат техн. наук. Окончил в 2009 г. Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева. Доцент кафедры «Ме-

ханизация животноводства и электрификация сельского хозяйства» Нижегородской государственной сельскохозяйственной академии. Область научных интересов: источники света, электромагнитная совместимость, качество электроэнергии



Терентьев Павел Валерьевич, кандидат техн. наук. Окончил в 2009 г. Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева. Доцент кафедры «Ме-

ханизация животноводства и электрификация сельского хозяйства» Нижегородской государственной сельскохозяйственной академии. Область научных интересов: источники света, электромагнитная совместимость, качество электроэнергии

Анализ и измерение воздействия солнечного излучения на фары автомобилей¹

Э. ЁЗТЮРК¹, М. АКТАС, Т. ШЕНЬЮЗ

Компания *Magneti Marelli Mako Elektrik Sanayi Ve Ticaret A.Ş.*, Бурса, Турция

¹E-mail: emre.ozturk@magnetimarelli.com

Аннотация

Целью данного исследования являлось обеспечение хорошей корреляции между результатами моделирования воздействия солнечного излучения на фары автомобилей и измерений, проводившихся с использованием сфокусированного солнечного излучения. Свет солнца, лучи которого параллельны друг другу (коллимированный свет), можно фокусировать при помощи выпуклых линз. Сфокусированное излучение вызывает появление горячих точек на окружающих линзу пластмассовых деталях, что может привести к обусловленным их плавлением отказам в высокотемпературных зонах. Моделирование воздействия солнечного излучения производится для исключения опасности обесцвечивания, деформации, выделения газов, разрушения покрытий и воспламенения при большой продолжительности этого воздействия. Облучённость рассматривается при моделировании как источник тепла, интенсивность которого зависит от угла падения солнечного излучения. На первом этапе моделирование осуществляется с шагом 5°, что позволяет определить критичные участки, а затем шаг уменьшается до 2°, чтобы выявить критичные значения азимутального угла и угла наклона. Критичные значения этих углов определяются при помощи трассировки лучей, позволяющей учесть отражение солнечных лучей и найти конструктивные решения, позволяющие избежать их фокусирования. По окончании численного анализа, направленного на ослабление воздействия солнечного излучения на фары автомобилей, необходимо провести соответствующие измерения. Измерения проводились с использованием тепловизора и имитатора чрезвычайно высококоллимированного солнечного излучения при всех критичных углах, которые были получены в результате моделирования. Проведено сравнение результатов моделирования и измеренных значений температуры, в которые были внесены поправки на условия окружающей среды.

Ключевые слова: воздействие солнечного излучения, автомобильные фары, горячая точка, зажигательное стекло, гидродинамическое моделирование.

1. Введение

Известно, что солнечный свет, будучи сфокусирован, приводит к плавлению материалов. Экспериментальные исследования повреждений, вызываемых воздействием солнечного света, проводились с использованием простых увеличительных стёкол, и наблюдавшиеся при этом результаты получили название «эффект зажигательного стекла» (*burning glass effect*). В отличие от излучения

других источников света, солнечные лучи благодаря своей параллельности могут фокусироваться линзами (рис. 1а) [1]. Увеличение количества применяемых в автомобильной промышленности линз и пластмасс сопровождалось увеличением количества повреждений, вызванных новыми разновидностями эффекта зажигательного стекла. Для формирования требуемого светораспределения в случае светодиодов (СД) и разрядных ламп высокого давления (РЛВД), используемых в высокотехнологичных автомобильных фарах, следует обеспечить малые фокусные расстояния [2, 3]. А это приводит к нежелательному фокусированию света на пластмассовых декоративных деталях, которые окружают линзы. Подобное фокусирование приводит к тому, что при длительной эксплуатации эти детали обесцвечиваются, деформируются, выделяют газы и обгорают.

В зависимости от угла падения излучения, оно может фокусироваться на передних или задних поверхностях (рис. 1б). По этой причине, используемые в фарах автомобилей линзы следует исследовать на предмет последствий воздействия солнечного излучения.

2. Материалы и метод

Были исследованы различные типы излучателей (рис. 2) и фасетных отражателей (*shell reflector*) (рис. 3), которые часто используются для размещения источников света в современных фарах.

Свет может фокусироваться на декоративных деталях, окружающих линзы излучателей или фасетные отражатели. Местоположение точки фокусировки зависит от внутренней конструкции фары и от характеристик её компонентов (покрытий, углов наклона поверхностей и т.д.).

В рамках первого исследования фары автомобиля (рис. 4) нами были рассмотрены крышка, тубус и фиксирующая РЛВД маска, которые не покрыты алюми-

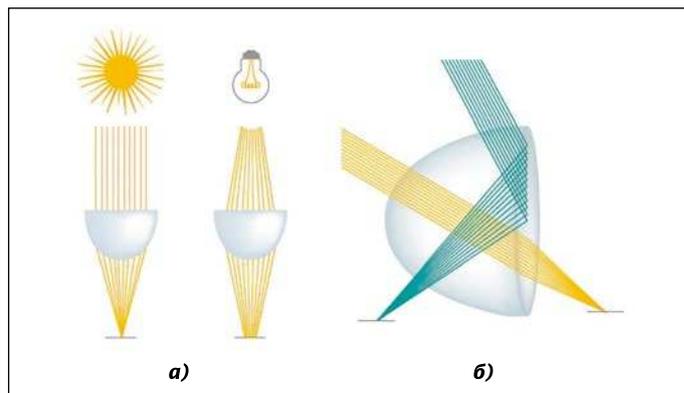


Рис. 1. Фокусирование солнечного света (а) и фокусирование света на передней и задней поверхностях (б)

¹ Перевод с англ. Е.И. Розовского



Рис. 2. Излучатели

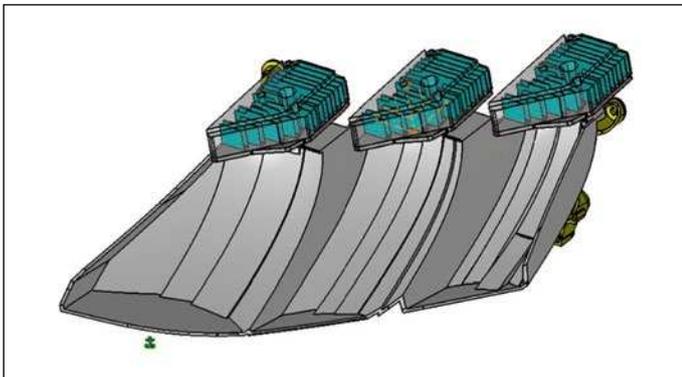


Рис. 3. Факетный отражатель

ем и имеют чёрный цвет. В рамках второго исследования фары автомобиля (рис. 5) нами была рассмотрена чёрная прокладка, представляющая собой декоративную деталь, закрывающую факетный отражатель.

В соответствии с требованиями, предъявляемыми покупателями, были идентифицированы те компоненты, которые могут оказаться под угрозой при воздействии на них солнечного света. Вначале с использованием трассировки лучей были проведены тепловые расчёты и определены критические значения углов, а затем было проведено моделирование теплового режима применительно к изменениям температуры, с тем чтобы определить предельно допустимые условия работы. Полученные расчётным путём критические значения углов были проверены экспериментально, после чего было проведено сравнение расчётных и экспериментальных результатов.

2.1. Теоретическое рассмотрение

В рамках теории атмосферной массы (*theory of air mass*), плотность потока прямого солнечного излучения (в приближении чистого воздуха) можно записать, как:

$$I_{direct} = I_0 \cdot 0,76^{AM^{0,618}}, \quad (1)$$

где $I_0 = 1353 \text{ Вт/м}^2$ – солнечная постоянная, $AM \geq \sim 0,5 \text{ кг}$ – атмосферная масса².

Атмосферная масса, которая зависит от высоты над уровнем моря h и зенитного угла Солнца γ , определялась

² Т. к. атмосферная масса, которую правильнее было бы назвать приведённой толщиной атмосферы, AM представляет собой отношение оптической длины пути при прохождении солнечного излучения через атмосферу к её минимальному значению (солнце в зените), то, во-первых, это величина безразмерная, и во-вторых, $AM \geq 1$. – Прим. пер.

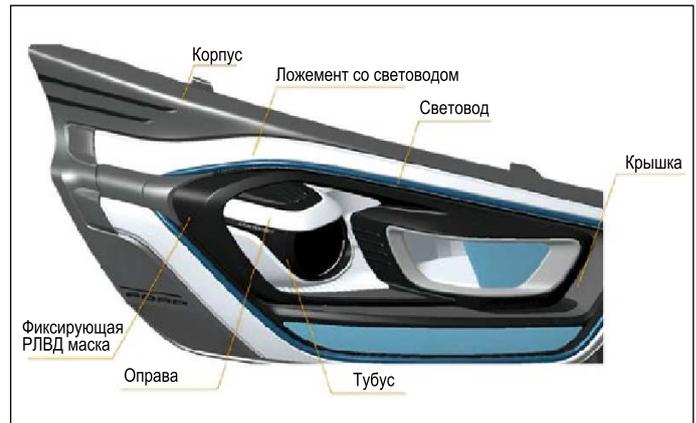


Рис. 4. Исследование, проведённое применительно к излучателю

согласно [4], тогда как радиус Земли r_{earth} и толщина атмосферы h_{atm} считались равными, соответственно, 6378 и 8,7 км.

Исследования проводились применительно к широте 0° , 21-му марта или 21-му сентября и зенитным углам, лежащим в интервале $0-90^\circ$. Приборы, используемые для измерения потока солнечного излучения, помещаются на высоте $h = 2 \text{ км}$ над уровнем моря, так что расчёты проводились на основе данных, полученных для этой высоты. Облучённость, которая зависит от зенитного угла, была рассчитана и использовалась в качестве входного параметра при проведении тепловых расчётов.

Численное моделирование осуществлялось применительно к стационарным условиям, а поток воздуха считался ламинарным. При проведении расчётов использовались все узловые точки теплопередачи. Основные уравнения, включающие в себя уравнение неразрывности, уравнение сохранения импульса и уравнение сохранения энергии для стационарного воздушного потока в условиях естественной конвекции, могут быть записаны на основе уравнений (2) – (6). Уравнение (7) решается численно применительно к твердотельным участкам без источников тепла. Соответствующие уравнения не могут быть сжаты (*compressed*) в прямоугольной системе координат, но если воспользоваться подходом Буссинеска, то для стационарного потока их можно записать, как:

$$\partial u/\partial x + \partial v/\partial y + \partial w/\partial z = 0, \quad (2)$$

$$u \cdot \partial u/\partial x + v \cdot \partial u/\partial y + w \cdot \partial u/\partial z = -1/\rho \cdot \partial p/\partial x + v \cdot (\partial^2 u/\partial x^2 + \partial^2 u/\partial y^2 + \partial^2 u/\partial z^2), \quad (3)$$

$$u \cdot \partial v/\partial x + v \cdot \partial v/\partial y + w \cdot \partial v/\partial z = -1/\rho \cdot \partial p/\partial y + v(\partial^2 v/\partial x^2 + \partial^2 v/\partial y^2 + \partial^2 v/\partial z^2), \quad (4)$$

$$u \cdot \partial w/\partial x + v \cdot \partial w/\partial y + w \cdot \partial w/\partial z = -1/\rho \cdot \partial p/\partial z + v \cdot (\partial^2 w/\partial x^2 + \partial^2 w/\partial y^2 + \partial^2 w/\partial z^2) + g \cdot \beta \cdot (T - T_\infty), \quad (5)$$

$$u \cdot \partial T/\partial x + v \cdot \partial T/\partial y + w \cdot \partial T/\partial z = \alpha \cdot (\partial^2 T/\partial x^2 + \partial^2 T/\partial y^2 + \partial^2 T/\partial z^2), \quad (6)$$

$$\partial^2 T/\partial x^2 + \partial^2 T/\partial y^2 + \partial^2 T/\partial z^2 + q/k = 0, \quad (7)$$

где u , v и w – составляющие вектора скорости, м/с; α – коэффициент температуропроводности, $\text{м}^2/\text{с}$; ν – коэффициент кинематической вязкости, $\text{м}^2/\text{с}$; β – коэффициент объёмного расширения; g – ускорение свободного падения,

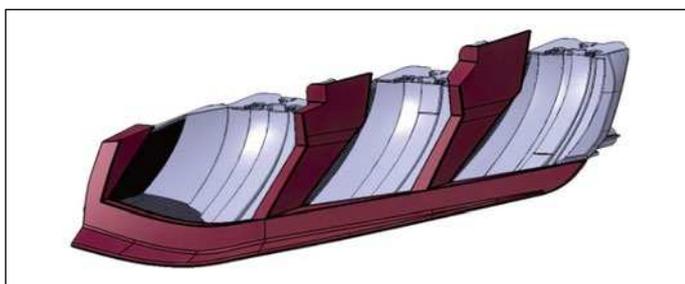


Рис. 5. Исследование, проведённое применительно к факетному отражателю

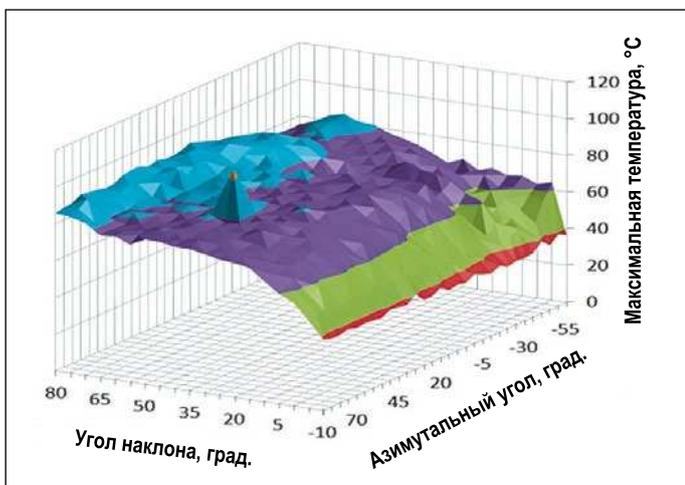


Рис. 6. Результаты моделирования с шагом 5°

m/c^2 ; T – температура, °C; ρ – плотность жидкости в области проведения расчётов, kg/m^3 ; k и q' – коэффициенты теплопроводности, $Вт/(м·К)$. Для всех составляющих вектора скорости на всех стенках выполняется условие отсутствия проскальзывания, и граничные условия записываются следующим образом:

Скорость: на всех стенках $u = v = w = 0$ м/с.

Давление: на сферической поверхности $p = 1$ атм.

Температура окружающей среды: $T = T_{\infty} = 23$ °C.

В данной работе, как и в других аналогичных исследованиях, использовался метод Монте-Карло, что обусловлено обеспечиваемой им устойчивостью численного решения уравнений и точностью расчётов переноса тепла излучением [5].

С учётом возможного наклона автомобиля на 10°, диапазоны сканирования составляли от –90 до 90° в случае азимутального угла и от –10 до 100° в случае угла наклона.

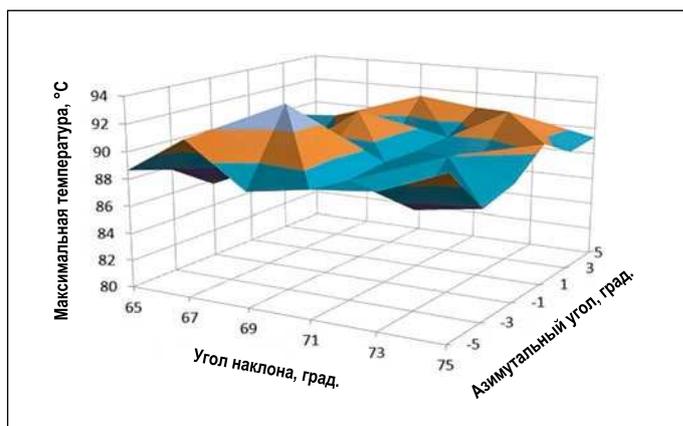


Рис. 7. Результаты моделирования с шагом 2°

Вначале был проведён термический анализ с шагом 5°, в результате которого применительно к температуре деталей были определены критичные угловые диапазоны (рис. 6).

На основе этих результатов, которые были получены с шагом 5°, был определён новый диапазон углов сканирования, применительно к которому был проведён термический анализ с шагом 2°, позволивший более точно определить значения углов (рис. 7).

После определения точных значений углов, соответствующих пиковым значениям результатов, которые были получены с шагом 2°, термический анализ был осуществлён повторно применительно к равной 80 °C температуре окружающей среды, что позволило максимально смоделировать наиболее жёсткие условия эксплуатации.

3. Результаты

3.1. Расчёты

Завершающее моделирование теплового режима было проведено применительно к уточнённым по результатам 2-градусного анализа значениям углов. Результаты, полученные применительно ко всем представляющим интерес деталям, приведены в табл. 1.

В случае тубуса (рис. 8), который имеется в излучателе, оказалось, что критичное направление задаётся равным 86° азимутальным углом и равным 35° углом наклона. Моделирование теплового режима было проведено для температуры окружающей среды 80 °C применительно именно к этим углам, для которых было рассчитано значение облучённости, создаваемой солнечным светом. При оценке риска принималась во внимание температу-

Таблица 1

Критичные углы

Деталь	Критичные углы, град.	
	Азимутальный	Наклона
Тубус	86	35
Чёрная прокладка	-14	15
Фиксирующая РЛВД маска	78	9
Крышка	3	69

Результаты моделирования и измерений

Деталь	Критичные углы, град.		Результат моделирования, °С	Результат измерений, °С	Расхождение результатов, %
	Азимутальный	Наклона			
Тубус	86	35	200	194	3,00
Чёрная прокладка	-14	15	190	188	1,05
Фиксирующая РЛВД маска	78	9	178	184	3,37
Крышка	3	69	129	131	1,55

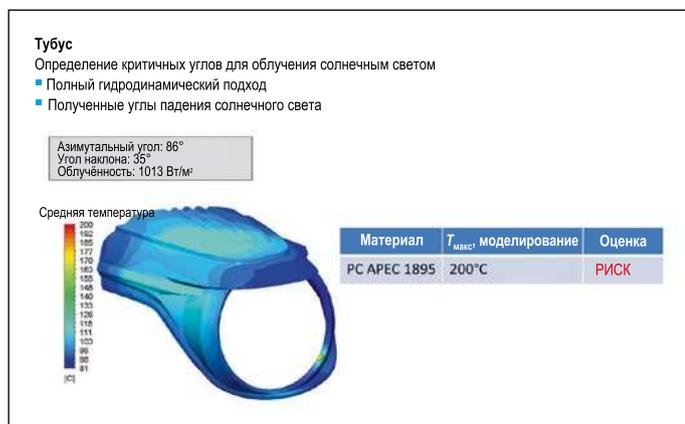


Рис. 8. Результаты термического анализа тубуса

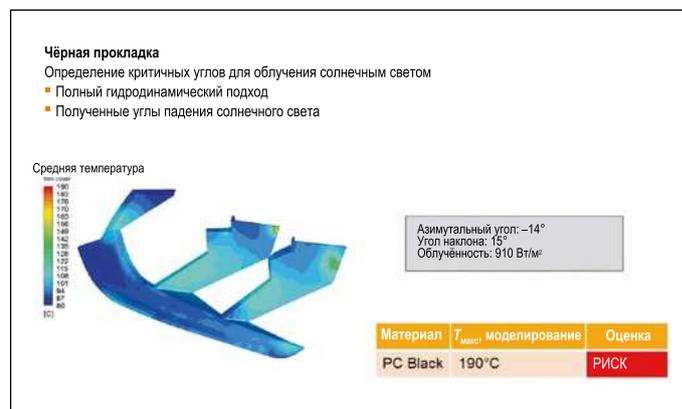


Рис. 10. Результаты термического анализа чёрной прокладки



Рис. 9. Результаты термического анализа фиксирующей РЛВД маски

ра размягчения по Вика различных видов поликарбоната [6]. Согласно результатам расчётов, максимальная температура на тубусе оказалась равной 200 °С.

В случае фиксирующей РЛВД маски (рис. 9) оказалось, что критичное направление задаётся равным 78° азимутальным углом и равным 9° углом наклона. Максимальная температура на фиксирующей РЛВД маске оказалась равной 178 °С.

В случае чёрной прокладки (рис. 10) оказалось, что критичное направление задаётся равным -14° азимутальным углом и равным 15° углом наклона. Максимальная температура на чёрной прокладке оказалась равной 190 °С.

3.2. Оптический анализ

Для исследования приводящего к появлению горячих точек фокусирования солнечных лучей была использована

оптическая система, сформированная с учётом критичных углов, полученных в результате проведения термического анализа. Оптическая стадия исследований осуществлялась с использованием программного модуля, написанного компанией *Automotive Lighting Company*.

В оптической системе обязательно присутствуют линза модуля (*module lens*), периферические детали (фиксирующая РЛВД маска, тубус и т.д.), а также внешние линзы. Центральная точка формируется на линзе модуля, и она же используется в качестве начала координат. Оси этой системы координат должны совпадать с осями используемого источника света. В рамках этой системы координат линии формируются в соответствии с определёнными позже критичными углами, тогда как для будущей области прохождения солнечных лучей создаётся своя система координат. Эта новая система координат формируется с учётом источника света и сформированного ранее файла *solar.dis* (входящий в состав программного модуля файл светораспределения (*light distribution file*)). Оптическая сцена формировалась применительно к передней поверхности фары. Эту сцену отнесли к категории «измерительный экран» (*measure screen*). Свет используемого источника света, отражённый или преломлённый в фаре, попадает на эту сцену, в результате чего оказывается возможным имитировать освещение дороги [7]. Участки поверхностей, которые в рамках рассматриваемой оптической системы оказываются горячими точками, считаются заданными, и трассировка лучей проводится с использованием по меньшей мере 1 млн лучей. Для мест на измерительном экране, которые соответствуют горячим точкам, при помощи обратной трассировки лучей определяются поверхности, от которых поступают преломлённые линзами модуля солнечные лучи.

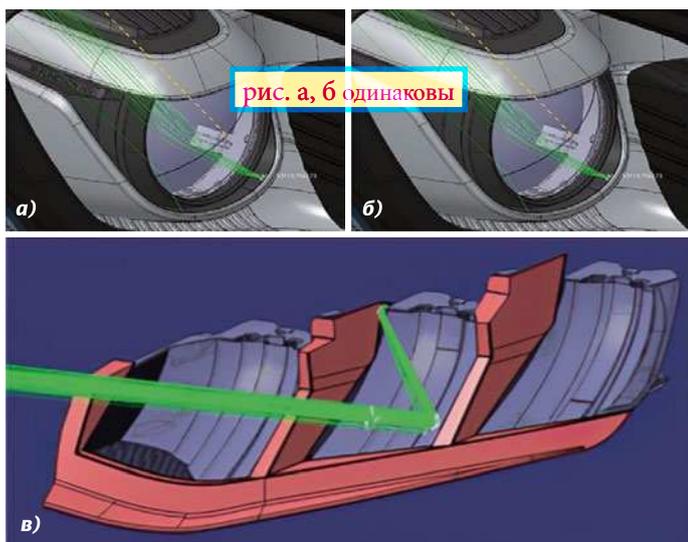


Рис. 11. Результаты расчётного определения горячих точек на трубе (а), фиксирующей РЛВД маске (б) и чёрной прокладке (в)

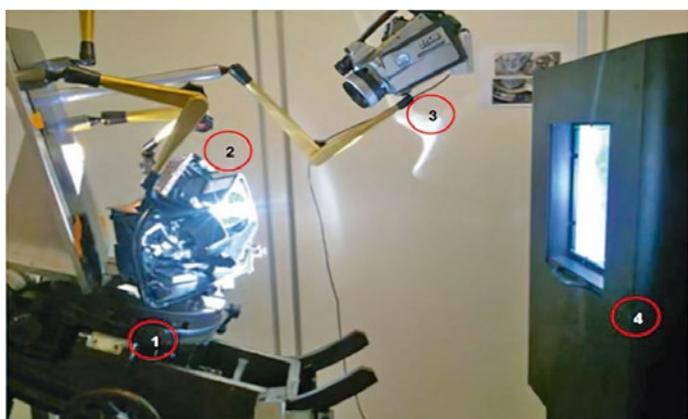


Рис. 12. Стенд для исследования фар: 1 – гониофотометр, 2 – фара, 3 – тепловизор, 4 – имитатор солнечного света

Результаты контрольных расчётов, проведённых применительно к оптической системе, сформированной с учётом углов, признанных рискованными на основе результатов термического анализа и рассмотрения фокусировки, приведены на рис. 11.

3.3. Результаты измерений

Результаты анализа были проверены в испытательной установке, сконструированной применительно к критичным углам. Фара помещалась в гониофотометр и подвергалась воздействию солнечного излучения. Температурные измерения всех деталей производились с использованием допускавшего перемещение по горизонтали и вертикали гониофотометра, который был настроен на критичные углы, полученные в результате проведённого термического анализа, и солнечного излучения, которое имитировалось испытательной установкой (рис. 12).

На рис 13 и 14 приведены, соответственно, результаты измерения температуры чёрной прокладки и фиксирующей РЛВД маски. Измерения производились при помощи тепловизора при температуре окружающей среды 23 °С. В результате было получено, что максимальные значения температуры на поверхностях чёрной прокладки и фикси-

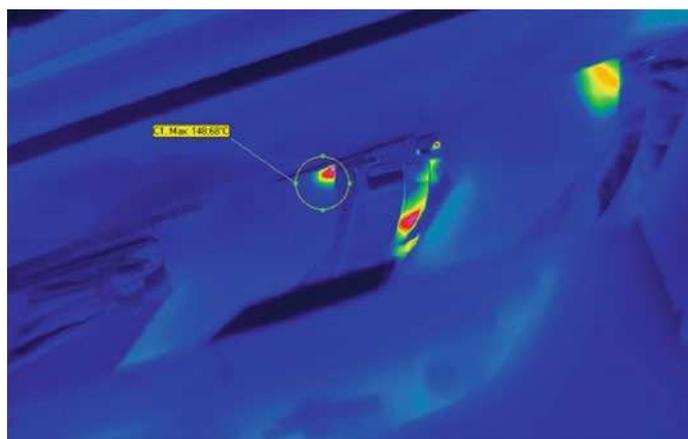


Рис. 13. Результаты тепловизионных измерений чёрной прокладки

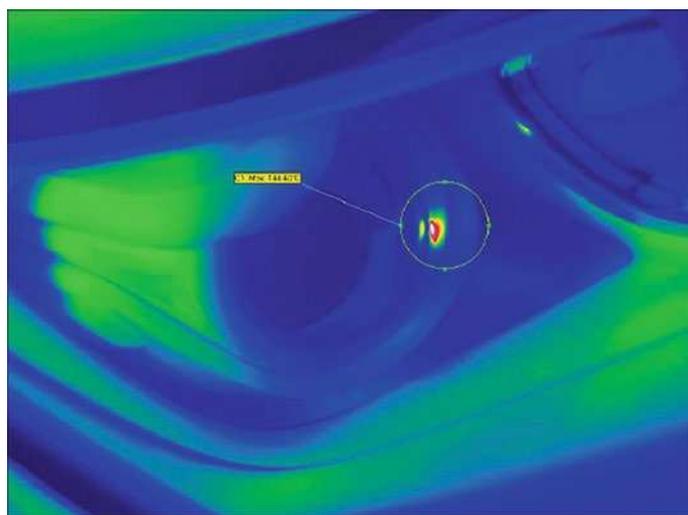


Рис. 14. Результаты тепловизионных измерений фиксирующей РЛВД маски

рующей РЛВД маски оказались равными, соответственно, 148,68 и 144, 40 °С.

4. Обсуждение

Так как измерения производились при комнатной температуре, то для обеспечения возможности сравнения с результатами расчётов в полученные результаты измерений были внесены поправки для приведения их к равной 80 °С температуре окружающей среды.

Результаты расчётов и измерений представлены в табл. 2. Было проведено сравнение результатов расчётов и результатов измерений, выполненных с использованием тепловизора, и определены расхождения между ними. Равное 3,37 % максимальное расхождение результатов имело место в случае фиксирующей РЛВД маски. Расхождение зависит от деформации пластмассовых деталей, их монтажа и производственных допусков и может быть как положительным, так и отрицательным. Исходя из значений температуры, полученных в результате анализа, можно предложить равное 10 °С минимальное с точки зрения безопасности допустимое отклонение от температуры размягчения пластмассовых деталей, предотвращающее возможность повреждения этих деталей по упомянутым причинам.

5. Заключение

Полученные расхождения между расчётными и экспериментальными данными не превышают 5 %, что говорит о совпадении результатов расчётов и измерений. Выбранные термопластичные материалы удалось предохранить от выцветания, деформации, выделения газов и подпалин при долгосрочном воздействии солнечного излучения, создаваемая которым облучённость соответствовала максимальному реальному уровню. В дальнейшем планируется проведение исследований с использованием материалов разного цвета, а также оптимизация входных параметров модели и сопоставление результатов расчётов с результатами измерений.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. The burning glass effect optical hot spot characterization for the automotive industry // Neonsee Application Note.– 2011. – No. 1.
2. Sivak, M., Schoettle, B., Flannagan, M.J. Mercury-free HID lamps: glare and colour rendering // Light. Res. Technol.– 2006. – Vol. 38, No. 1. – P. 33–40.
3. Jang, S., Shin, W.S. Thermal analysis of LED arrays for automotive head lamp with a novel cooling system // IEEE Trans. Dev. Mater Reliab.– 2008. – Vol. 8, No. 3. – P. 561–564.
4. Kasten, F., Young, A.T. Revised optical air mass tables and approximation formula // Applied Optics.– 1989. – Vol. 28. – P. 4735–4738.
5. Fischer, P. Radiative Heat Redistribution and Natural Convection Flow Inside an Automotive Fog Lamp // Proc. of the 6th Int. Symp. on Automotive Lighting, Darmstadt, Germany. 2001.
6. https://www.plastics.covestro.com/~media/Product%20Center/PCS/Images/5_Library/Product%20brochures/Apec/Apec%20brochure.pdf?la=en&force=1

7. Blanckenhagen, B. v. Accurate Stray Light Simulations with the Bi- Directional Reflection Distribution Function // ISAL, 2005, P39.



Эмре Ёзтюрк (Emre Öztürk), M. Sc. (2014 г.).
Место работы: компания Magneti Marelli Mako Elektrik Sanayi Ve Ticaret A.Ş., Бурса, Турция



Мехмет Акмас (Mehmet Aktas), M. Sc. (2013 г.). Аспирант Университета Улудаг (Ph.D.). Место работы: компания Magneti Marelli Mako Elektrik Sanayi Ve Ticaret A.Ş., Бурса, Турция



Тунч Шеньюз (Tunç Şenyüz), Ph.D. Место работы: компания Magneti Marelli Mako Elektrik Sanayi Ve Ticaret A.Ş., Бурса, Турция

Сельское хозяйство и солнечные панели – win-win стратегия для энергетиков и фермеров

Массивы фотоэлементов обычно размещают в безлюдных местах, где нет ни полей, ни домов. Что касается полей – так делают потому, что, во-первых, солнечные панели требуют обслуживания, и никто не хочет, чтобы его посевы вытаптывали. Во-вторых, панели отбрасывают тень, что негативно влияет на рост многих растений.



Но, как оказалось, второй фактор может стать преимуществом а не недостатком, в результате чего солнечные энергоустановки станут помогать выращивать тенелюбивые культуры. Таких немало, прямые солнечные лучи просто «сжигают» растения, любящие тень. Они либо погибают, либо не плодоносят. Оптимальные варианты комбинации солнечных панелей с сельским хозяйством сейчас ищут учёные из Аризонского университета.

Исследования проводятся на Юго-Западе США, где солнечно и сухо, так что тенелюбивые растения здесь не выращивают. И как раз в этом регионе солнечные панели могут оказаться очень полезными, поскольку они, затеняя большие площади поверхности, снижают уровень испарения влаги и защищают растения от прямых солнечных лучей. На данный момент уже готов испытательный комплекс. Здесь фотоэлементы размещены на высоте 3 м от поверхности земли – выше, чем это делается в обычной ситуации.

Для своего эксперимента учёные решили использовать три испытательных комплекса (а, скорее, грядки). Первый включает лишь растения, второй – панели, третий – и растения, и панели. Сельскохозяйственные культуры – перцы «халапеньо» и «чилтепин» и помидоры.

Результаты показали, что испарение влаги действительно замедляется в зоне, где стоят панели (собственно, это очевидно, если есть тень, то, ко-

нечно, испарение идёт более медленными темпами). Температура почвы немного ниже общего уровня днём и выше – ночью.

Что касается сельскохозяйственных культур, то они и вовсе чувствуют себя хорошо. Так, «чилтепин» рос явно активнее под солнечными панелями. Активность развития растений определяли по концентрации CO_2 . Растения, которые произрастали в тени, давали на треть больше этого газа, чем те, что были вынуждены расти под лучами солнца, а их урожай был втрое выше, чем у выставленных на солнце.

«Халапеньо» чувствовали себя примерно одинаково хорошо и на солнце и в тени. «Теневые» развивались на 11 % медленнее, чем их «солнечные» собратья, но зато они потребляли на 65 % меньше воды. Разницы в урожайности почти не было – всё в рамках статистической погрешности.

Ну а помидоры в тени развивались на 65 % активнее, чем на солнце, потребляли на 65 % меньше воды и дали двойной по сравнению с «солнечными» растениями урожай.

Что касается солнечных панелей, то, по расчётам учёных, небольшое снижение температуры конструкций, которые стояли на грядках с растениями, привело к росту генерации энергии примерно на 3 %. (В силу пониженной температуры почвы и воздуха над растениями немного снижалась и температура конструкций.)

По словам исследователей, комбинирование фотоэлементов и сельскохозяйственных насаждений даёт возможность сократить потребление воды растениями, увеличить урожайность определённых видов, начать выращивать тенелюбивые сорта в местах, где много солнца, а также, хоть и совсем чуть-чуть, но повысить объёмы выработки электричества панелями. Да и для работников на полях наличие тени – существенный плюс.

nanonewsnet.ru/news/
09.09.2019

Разработка модуля торцевой подсветки для автостереоскопического дисплея¹

Ч.-М. ХУН, К.-Л. ЛИ*, Ч.-Е. ЛИН, М.-В. ЧЕН, Д.-Д. ВУ

Национальный Технологический Университет города Тайбэй, Тайвань

*E-mail: kllee@ntut.edu.tw

Аннотация

Работа посвящена изучению и оптимизации модуля торцевой подсветки для трёхмерного жидкокристаллического дисплея мобильного телефона. Модуль спроектирован с микроструктурами на верхней и нижней поверхностях светопроводящей пластины, чтобы обеспечить мультиплексированную во времени проекцию света в глаза наблюдателя. Модель модуля создана с помощью оптического программного обеспечения (TracePro) и жидкокристаллического программного обеспечения (LCDMaster 2D). Результаты эффективно устраняют необходимость в призматических панелях и удовлетворяют трём основным показателям производительности, а именно: угол излучения света, равномерности освещения и устранение перекрёстных помех.

Ключевые слова: геометрическая оптика, оптика в вычислительной технике, проектирование и изготовление оптики, физическая оптика.

1. Введение

В связи с постепенной популярностью трёхмерных изображений в повседневной жизни люди наслаждаются трёхмерным изображением, вызванным сенсорной стимуляцией. Автостереоскопические дисплеи работают путём испускания двух лучей света под разными углами для левого и правого глаз зрителя, тем самым создавая стереоскопическое изображение [1,2]. Этот метод называется мультиплексированным-2D, то есть он использует 2D-экран для получения 3D-изображений, и этот способ можно разделить на два основных типа: пространственно-мультиплексированные и мультиплексированные во времени. Современная технология пространственно-мультиплексированного типа для автостереоско-

пических дисплеев требует, чтобы периодическое полосатое покрытие, призматическая панель или ленточные растрсы создавали для правого глаза и левого глаза две группы сигналов одновременно, при этом не только яркость и разрешение будут снижаться, но и будут большие потери энергии [3–6]. Технология мультиплексированного во времени типа периодически генерирует левое изображение и правое изображение, проецируя левый и правый глаз соответственно. Частота этого сигнала больше частоты зрительного восприятия, что позволяет наблюдателю порождать стереоскопическое зрение [7–15]. Модуль торцевой подсветки может снизить затраты, если он может быть разработан для создания света только для левого и правого глаза с помощью светопроводящей пластины (СПП). В этом исследовании предлагается использовать торцевую подсветку для мультиплексированных во времени стереоскопических дисплеев для мобильных телефонов.

Левый и правый глаз наблюдателя перпендикулярен направлению излучения. Углы излучения для глаз наблюдателя составляют примерно $\pm 10^\circ$, как показано на рис. 1. СПП может обеспечить яркость в нужном направлении и равномерность выходящего света [16–19].

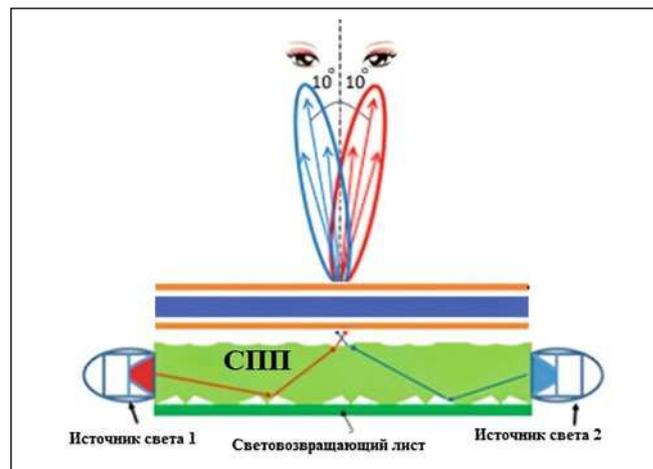
Мы проектируем 5,0-дюймовую СПП с временным мультиплексированием, чтобы генерировать два узконаправленных ИС на основе оптимизированных микроструктурных панелей. Когда ИС слева и справа активны, СПП может излучать свет непосредственно в правый и левый глаз наблюдателя соответственно.

Благодаря связи между последовательно переключающимися источниками света и жидким кристаллом левый и правый глаз может получать два сигнала для достижения стереоскопического эффекта. Оптическое программное обеспечение TracePro™ используется для моделирования освещённости, направления, равномерности и перекрёстных помех выходящего света. Показано, что предлагаемые нами СПП с V-образным вырезом и изогнутой микроструктурой обладают идеальной эффективностью с точки зрения угла ориентации, равномерности и перекрёстных помех выходящего света.

2. Структура устройства

На рис. 2а изображена структура модуля торцевой подсветки, включая СПП, световозвращающий лист, плоскость наблюдения и источники света слева и справа. Каждый источник света содержит двенадцать светодиодов, расположенных вдоль оси z. СПП изготовлена из полиметилметакрилата (ПММА); его показатель преломления составляет 1,49, площадь – 110 мм × 65 мм, а его толщина – 3 мм. В табл. 1 представлены характеристики светодиода Siemens LWT676. Поверхность световозвращающего листа – диффузно белого цвета. Плоскость наблюдения находится на 1 мм выше СПП

Рис. 1. Модуль торцевой подсветки в автостереоскопическом дисплее



¹ Перевод с англ. А.Ю. Басова

Таблица 1

Характеристики светодиода
Siemens LWT676

Характеристика	Значение
Световой поток, лм	0,05
Длина волны, мкм	0,5461
Угловое распределение	Ламбертовское
Количество лучей в файле	240000

и может определять распределение освещённости выходящего света.

Три типа микроструктур СПП сравниваются друг с другом (рис. 2б, в, г). Тип I имеет V-образную микроструктуру на нижней поверхности. Задавая медиану СПП в качестве плоскости симметрии, микроструктуры V-разреза описываются одномерным линейным уравнением в соответствии с предыдущим исследованием [20], как показано в (1).

$$S = aT - b, \quad (1)$$

где S – интервал с V-образным сечением, T – интервал без V-образного сечения; S и T являются параметрами регулировки. Интервал T необходим для равномерного распределения света по всей области СПП. Без интервала T световые лучи будут интенсивно распространяться в области вблизи источника света. Микроструктуры располагаются вдоль оси x , но в двух противоположных направлениях на нижней поверхности СПП. Как показано на рис. 2б, левая и правая половины СПП имеют микроструктуры, описываемые одномерными линейными уравнениями вдоль осей $+x$ и $-x$ соответственно. Каждое углубление V-образной микроструктуры имеет угол при вершине 55° и углы при основании 40° и 85° . Расстояние между высшими точками каждого углубления составляет 0,05 мм.

СПП типа II имеет симметричную V-образную микроструктуру с фиксированным интервалом w , которая равномерно расположена на его нижней поверхности. Микроструктура создаётся двумя противоположно расположенными микроструктурами типа I, каждая шириной 0,10 мм, как показано на рис. 2в.

Тип III сочетает в себе конструкцию типа II с другой микрострукту-

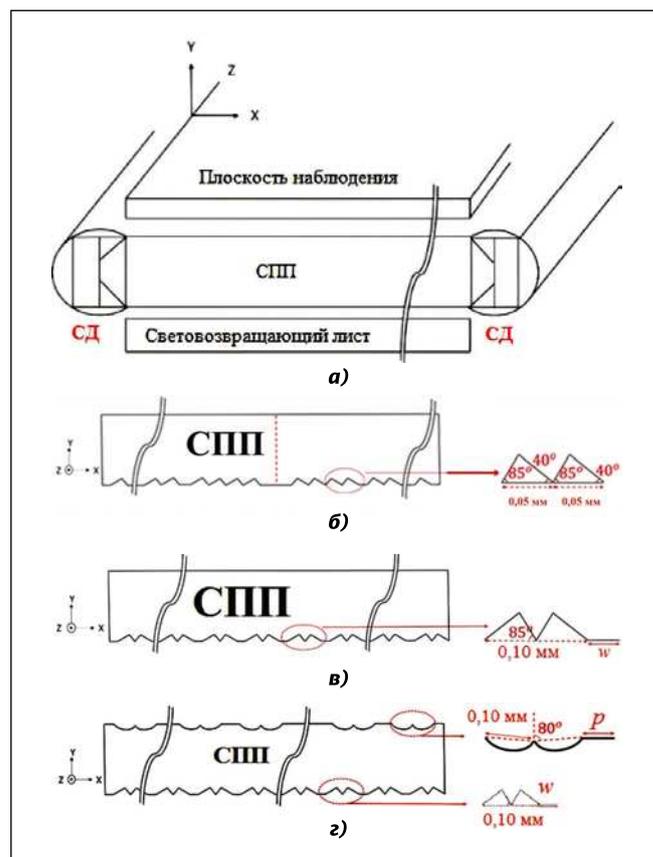


Рис. 2. а – Устройство модуля подсветки; б – Тип I; в – Тип II; г – Тип III

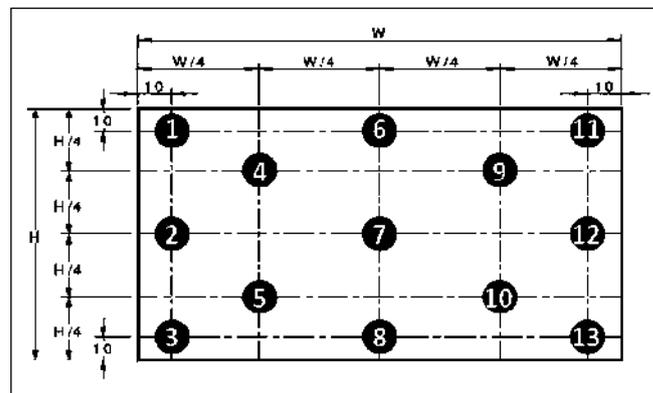


Рис. 3. Освещённость в 13 точках в плоскости наблюдения

рой, равномерно расположенной на верхней поверхности СПП. Эта другая микроструктура симметрично изогнута с фиксированным интервалом p . Изогнутая микроструктура состоит из двух круглых дуг, каждая шириной 0,10 мм, а степень наклона каждой изогнутой поверхности составляет $\pm 10^\circ$, как показано на рис. 2 г.

Перекрытые помехи (*crosstalk*) между правым и левым видами для центрального наблюдателя определяются следующим уравнением [14]:

$$crosstalk = \frac{1}{2} \left(\frac{I_L(\theta_R)}{I_R(\theta_R)} + \frac{I_R(\theta_L)}{I_L(\theta_L)} \right), \quad (2)$$

где I_R и I_L – измеренная максимальная интенсивность для правого и левого вида при углах наблюдения θ_R и θ_L соответственно. В этом эксперименте мы обнаружили, что соотношение утечки (*leakage*) к сигналу (*signal*) одинаково при 10° и -10° для левого и правого глаза. Определение перекрёстных помех присутствует в этом исследовании следующим образом [21]:

$$crosstalk = \frac{leakage}{signal} \cdot 100\%. \quad (3)$$

Здесь утечка определяется как максимальная яркость света, который просачивается из незапланированного канала в планируемый, тогда как

СПП с V-образными микроструктурами на нижней поверхности

Тип	Равномерность, %	Направление излучения ¹⁾	Перекрёстные помехи, % ²⁾
Тип I, $S=T-10$ ($T \geq 13$)	10,3	-85° и 85°	
Тип II-1, $w=1,5$ мм	81,7	-10° и 10°	13,8 и 13,9
Тип II-2, $w=1,2$ мм	77,3	-10° и 10°	12,5 и 12,6
Тип II-3, $w=1,0$ мм	73,2	-10° и 10°	11,2 и 11,5
Тип II-4, $w=0,8$ мм	66,2	-9° и 9°	11,1 и 11,0
Тип II-5, $w=0,5$ мм	56,2	-9° и 9°	9,0 и 8,9

1) максимальный угол освещения для левого и правого источника

2) перекрёстные помехи в канале левого и правого глаза

сигнал определяется как максимальная яркость планируемого канала, который наблюдается под углом максимального излучения света. В этом исследовании мы стремимся уменьшить перекрёстные помехи. В канале для правого глаза отношение измеренной яркости правого источника света (утечки) к яркости левого источника света (сигнала) должно быть ниже. И наоборот, соотношение должно быть ниже и в левом канале.

В дополнение к проверке перекрёстных помех источника направленного света, равномерность принимается за величину для оценки производительности модуля торцевой подсветки на автостереоскопическом дисплее. На рис. 3 показана равномерность выходящего света. Отношение минимальной освещённости (E_{min}) к максимальной освещённости (E_{max}) в 13 точках на плоскости наблюдения может быть выражено уравнением:

$$Uniformity = \frac{E_{min}}{E_{max}} \cdot 100\%. \quad (4)$$

Эффективность оптического преобразования (η) выходящего света определяется как отношение освещённости в плоскости наблюдения (E_n) к освещённости, создаваемой источником света (E_u), и оценивается по формуле:

$$\eta = \frac{E_i}{E_e} \cdot 100\%. \quad (5)$$

3. Результаты и обсуждение

Шесть моделей СПП микроструктур сравниваются друг с другом с точки зрения равномерности, угла максимального излучения света и перекрёстных помех, как показано в табл. 2. Тип I СПП микроструктуры с V-образным вырезом на нижней поверхности описывается величинами $S = T-10$ ($T \geq 13$), с $a = 1$ и $b = 10$. Для СПП типа II-1, II-2, II-3, II-4 и II-5 w (интервал на нижней поверхности) установлен на 1,5 мм, 1,2 мм, 1,0 мм, 0,8 мм и 0,8 мм соответственно.

В результате измерения проводятся от левого и правого глаза зрителя перпендикулярно излучению света. Максимальное излучение света СПП типа I сосредоточено на стороне источника, а максимальные углы излучения света составляют 85° и -85° ; значения для СПП типа II-4 и типа II-5 составляют 9° и -9° , тогда как значения всех дру-

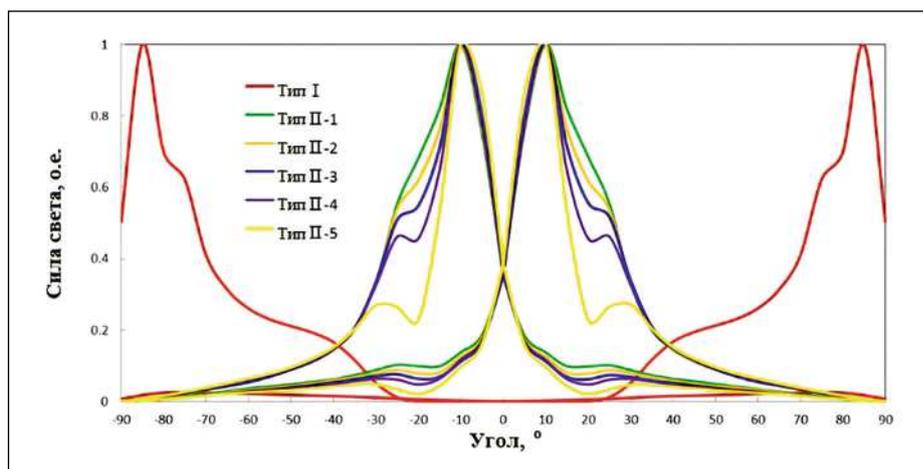


Рис. 4. График распределения силы света

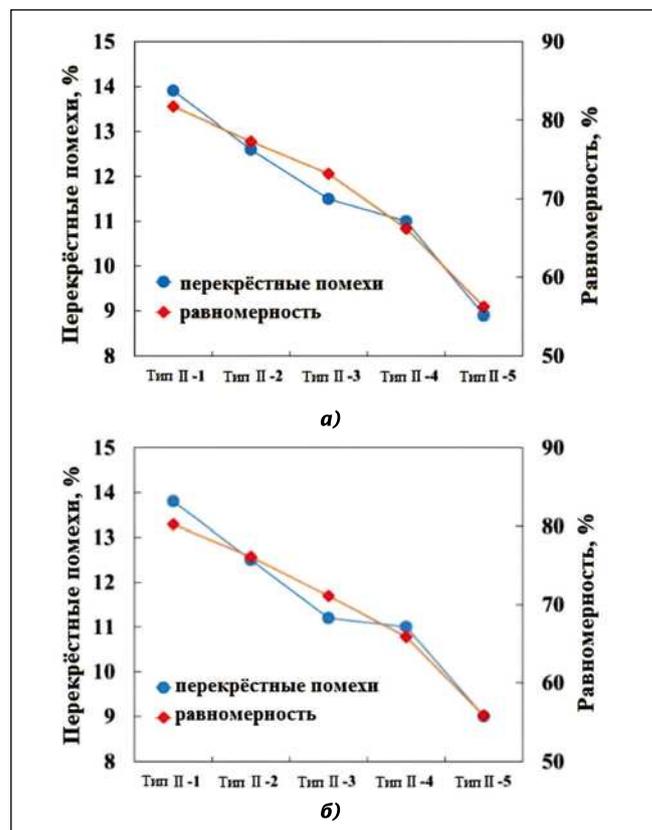
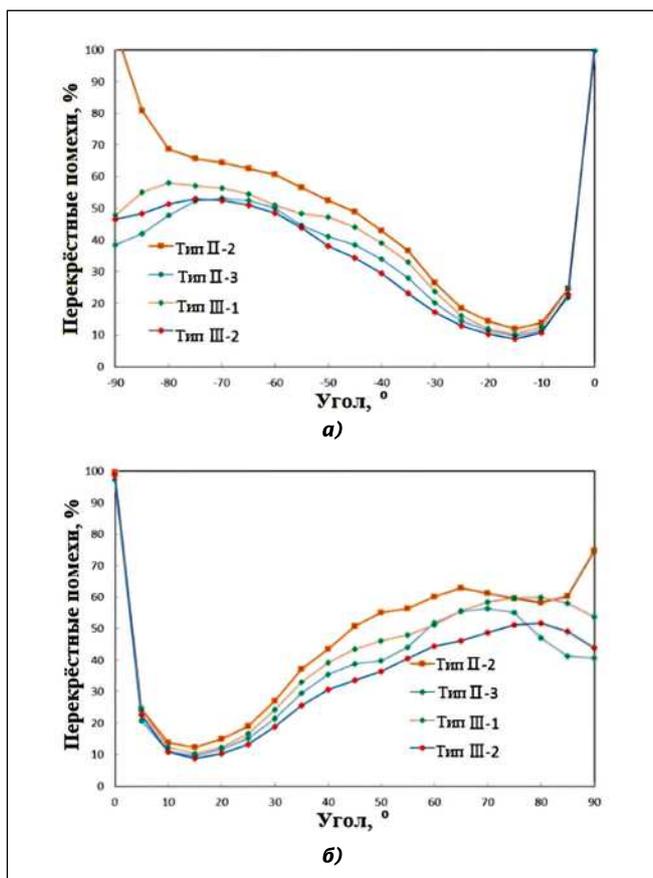


Рис. 5. Сравнение равномерности и перекрёстных помех:
а – левого источника света; б – правого источника света

Рис. 6. Перекрестные помехи: а – когда излучает правый источник света; б – когда излучает левый источник света



гих СПП составляют 10° и -10° . Эти результаты показывают, что максимальные углы излучения света в конструкциях типа II являются более подходящими, чем в конструкции типа I, для использования в модуле торцевой подсветки, как показано на рис. 4 и 5.

Сравнивая равномерность и перекрестные помехи на рис. 5, мы видим, что более низкие значения w дают более низкие перекрестные помехи и равномерность, тогда как более высокие значения дают более высокие перекрестные помехи и равномерность. Поскольку основные параметры для оценки производительности модулей торцевой подсветки для автостереоскопических дисплеев с временным мультиплексированием имеют более высокую равномерность, более низкие перекрестные помехи и максимальное излучение света, мы выбираем модели типа II-2 и II-3 для использования, поскольку их равномерность выше 70 %, перекрестные помехи составляют менее 13 %, а углы излучения света составляют 10° и -10° .

Чтобы уменьшить перекрестные помехи в каналах для левого и правого глаза, мы добавляем изогнутые микроструктуры на верхушках СПП типа II-2 и типа II-3, образуя конструкции типа III-1 и типа III-2 соответственно (рис. 2г). Изогнутые микроструктуры расположены симметрично с фиксированным интервалом $p = 1,1$ мм. Когда левый и правый источники активны, обнаруживаются результаты равномерности и эффективности оптического преобразования в плоскости наблюдения, а результаты перекрестных помех обнаруживаются при максимальных углах излучения света -10° и 10° , как обобщено в табл. 3.

Для диапазона углов наблюдения человеческого глаза от $\pm 7,5^\circ$ до $\pm 20^\circ$ мы отмечаем, что конструкция типа III-2 имеет наилучшее качество с точки зрения мультиплексированной по времени проекции в глаза для автостереоскопического дисплея и что эффективность оптического преобразования конструкций типа III-1 и типа III-2 выше, чем у типов III-2 и типа II-3. На рис. 6а, б показаны перекрестные помехи, обнаруженные на плоскости наблюдения, когда правый и левый источники излучают свет в левый и правый каналы соответственно. Карты освещенности конструкции типа III-2 показаны на рис. 7а, б. На рис. 8

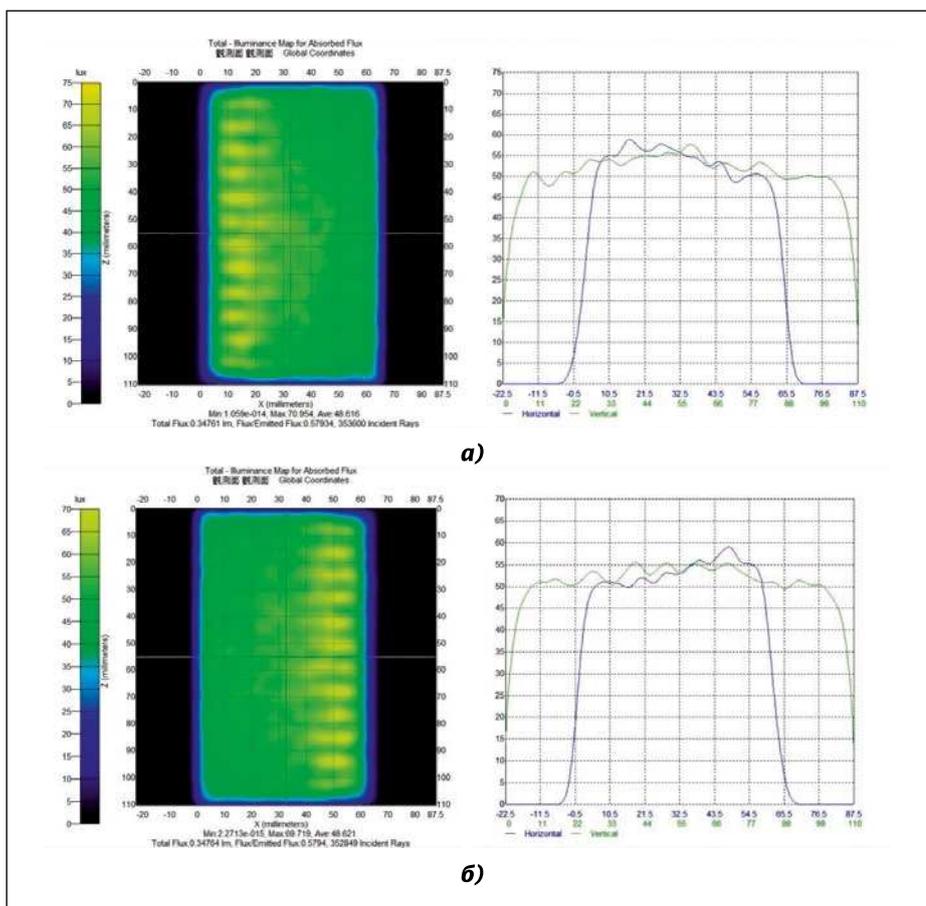


Рис. 7. Карта освещенности СПП типа III-2: а – равномерность 76,1 %, когда излучает левый источник света; б – равномерность 75,9 %, когда излучает правый источник света

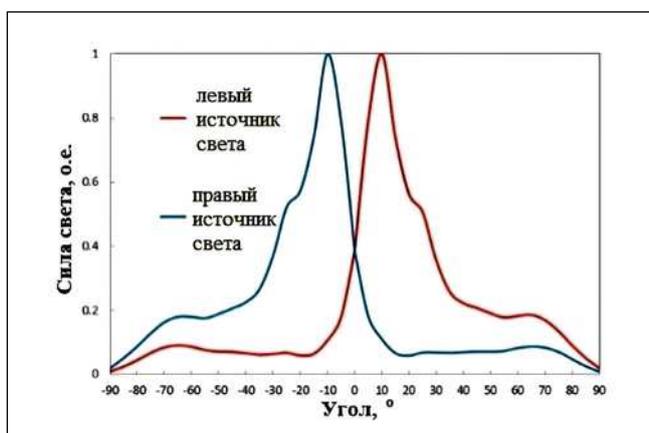
Равномерность, эффективность оптического преобразования и перекрёстные помехи

Тип	Фиксированные интервалы w и p	Равномерность, %	$\eta, \%^{3)}$		Перекрёстные помехи, % ⁴⁾	
II-2	$w = 1,2$ мм	77,3	49,7	49,9	12,5	12,0
II-3	$w = 1,0$ м	73,2	53,0	53,1	12,6	12,3
II-1	$w = 1,2$ мм, $p = 1,1$ мм	77,3	56,0	56,0	11,2	10,7
II-2	$w = 1.0$ мм, $p = 1,1$ мм	73,2	57,9	57,9	11,5	10,9

³⁾ эффективность оптического преобразования для левого и правого ИС

⁴⁾ перекрёстные помехи в канале левого и правого глаза

Рис. 8. График распределения силы света СПП типа III-2, когда излучают оба источника



кристаллы, параметры которых имеют упругие постоянные: $k_{11} = 16,7$ пН, $k_{22} = 1$ пН, $k_{33} = 18,1$ пН, $\Delta n = 0,083$ и $\Delta \varepsilon = -4,2$. Зазор жидкокристаллической ячейки составляет 10 мкм. Результаты моделирования приведены на рис. 10.

Сравнивая рис. 10 с рис. 9, мы находим почти одинаковые угол направления излучения света, равномерность освещения и устранение перекрёстных помех.

4. Заключение

Было отмечено, что конструкция СПП типа III-2 обеспечивает наибольшую яркость при $\pm 10^\circ$ для глаз человека. Эта конструкция демонстрирует среднюю равномерность выше 75 %, средний коэффициент перекрёстных помех ниже 10,8 % и эффективность оптического преобразования выше 57,9 %. Наши успешные результаты эффективно устраняют необходимость в призматической панели и удовлетворяют трём основным рабочим параметрам, включая направленный угол излучения света, равномерность освещения и устранение перекрёстных помех.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Yuukia A., Agaria M., Iwsakia N., Sasagawa T., Tahataa S., Satakea T., Murakamia O., Odaa K., Itob A., Miyakeb S. A new field sequential stereoscopic LCDs by use of dual-directional-backlight // Journal of Information Display.– 2004.– № 5. – С. 6–9.

2. Lee B. Three-dimensional displays, past and present // Phys. Today.– 2013.– № 66. – С. 36–41.

3. Xiao X., Javid B., Martinez-Corral M., Stern A. Advances in three-dimensional integral imaging: sensing, display, and applications // Appl. Opt.– 2013.– № 52. – С. 546–560.

представлен график распределения силы света для СПП типа III-2.

На рис. 9 показаны смоделированные с помощью жидкокристаллического программного обеспечения (LCD Master 2D) результаты для конструкции типа III-2. В качестве примера на рис. 1 мы моделируем параме-

тры освещения ячейки со скрученным нематиком. Мы установили толщину поляризатора 10 мкм и угол 45° , толщина анализатора 10 мкм и угол 135° на рис. 1, направления выравнивания верхней и нижней подложек параллельны поляризатору и анализатору соответственно. Добавлены жидкие

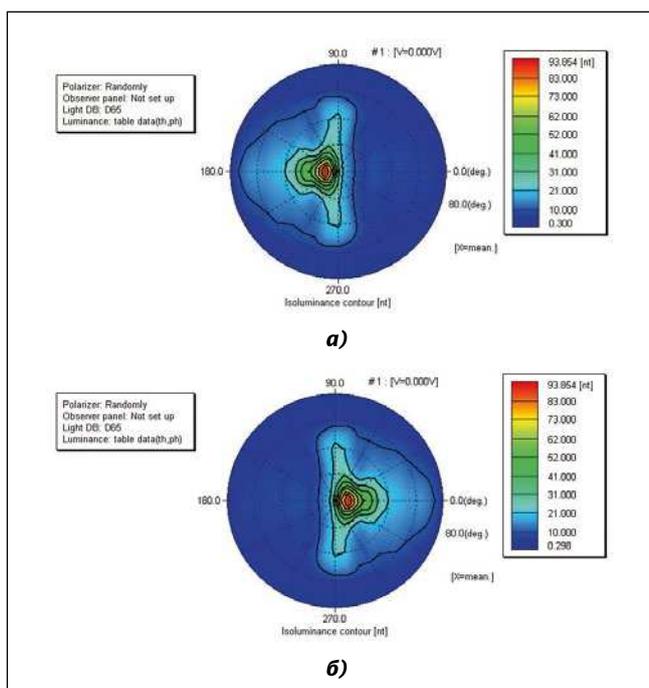
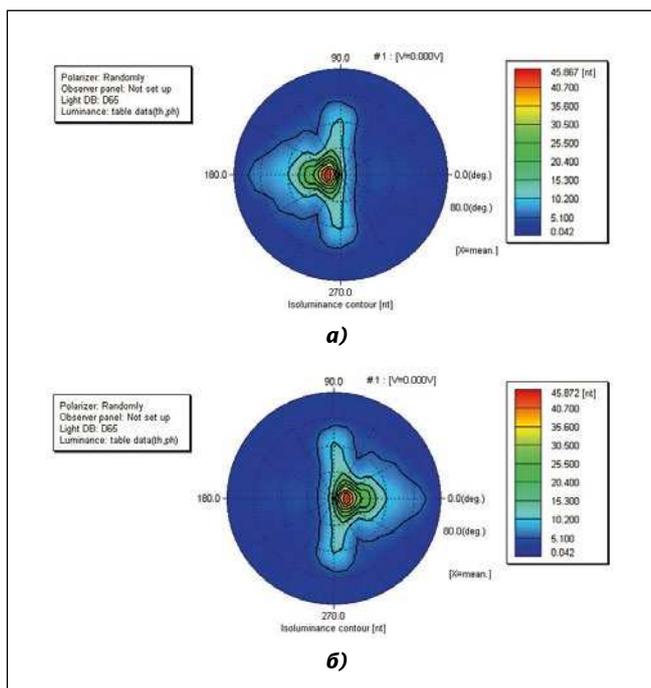


Рис. 9. Яркость, создаваемая:
а – правым источником света;
б – левым источником света

Рис. 10. Освещение жидкого кристалла: а – правым источником света; б – левым источником света



4. *Maphepo W., Huang Y.P., Shieh H.P.D.* Enhancing the brightness of parallax barrier based 3D flat panel mobile displays without compromising power consumption // *J. Disp. Technol.*– 2010. № 6. – С. 60–64.

5. *Chen C.H., Huang Y.P., Chuang S.C., Wu C.L., Shieh H.P., Mphopo W., Hsieh C.T., Hsu S.C.* Liquid crystal panel for high efficiency barrier type autostereoscopic displays // *Appl. Opt.*– 2009.– № 48. – С. 3446–3454.

6. *Inoue Y., Sakamoto S., Takahashi K., Kanai C., Imai Y., Shimpuku Y.* A novel parallax liquid crystal barrier for temporally interlaced autostereoscopic 3D displays // *SID Digest.*– 2012.– № 43. – С. 221–224.

7. *Huang Y.P., Chen C.W., Shen T.C., Huang J.F.* Autostereoscopic 3D display with scanning multi-electrode driven liquid crystal (MeD-LC) lens // *J. 3D Res.*– 2010.– № 1. – С. 39–42.

8. *Chen C.W., Cho M., Huang Y.P., Javidi B.* Improved viewing zones for projection type integral imaging display using adaptive liquid crystal prism array // *J. Disp. Technol.*– 2014.– № 10. – С. 198–203.

9. *Lee B., Park J.H.* Overview of 3D/2D switchable liquid crystal display technologies // *Proc. SPIE7618, 761806.*– 2010.

10. *Huang Y.P., Liao L.Y., Chen C.W.* 2-D/3-D switchable autostereoscopic display with multi-electrically driven liquid-crystal (MeD-LC) lenses // *J. Soc. Inf. Disp.*– 2010.– № 18. – С. 642–646.

11. *Chang Y.C., Jen T.H., Ting C.H., Huang Y.P.* High-resistance liquid-crystal lens array for rotatable 2D/3D autostereoscopic display // *Opt. Express.*– 2014. № 22. – С. 2714–2724.

12. *Jen T.H., Chang Y.C., Ting C.H., Shieh H.P., Huang Y.P.* Locally controllable liquid crystal lens array for partially switchable

2D/3D display // *J. Disp. Technol.*– 2015.– № 11. – С. 839–844.

13. *Brott R., Schultz J.* Directional backlight guide considerations for full resolution autostereoscopic 3D displays // *SID Digest.*– 2010.– № 41. – С. 218–221.

14. *Ting C.H., Chang Y.C., Chen C.H., Huang Y.P., Tsai H.W.* Multi-user 3D film on a time-multiplexed side-emission backlight system // *Applied Optics.*– 2016.– № 55. – С. 7922–7928.

15. *Chien K.W., Shieh H.P.D.* Time-multiplexed three-dimensional displays based on directional backlights with fast-switching liquid-crystal displays // *Applied Optics.*– 2006.– № 45. – С. 3106–3110.

16. *Chen C.F., Kuo S.H.* A Highly Directional Light Guide Plate Based on V-grooves Microstructure Group // *Journal of Display Technology.*– 2014.– № 10. – С. 1030–1035.

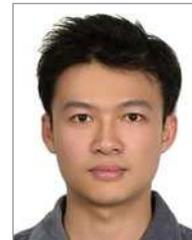
17. *Chen J.W., Lee K.L., Wu J.J., Lin C.Y.* Design a backlight system to a LCD of vertical-field-switching bluephase // *Optik.*– 2014.– № 125. – С. 6713–6715.

18. *Lee K.L., He K.Y.* Effect of Micro-Structural Light Guide Plate on Source of Linearly Polarized Light // *Journal of Lightwave Technology.*– 2011.– № 29. – С. 3327–3330.

19. *Yan J.R., Wang Q.H., Li D.H., Zhang J.D.* Edge-Lighting Light Guide Plate Based on Micro-Prism for Liquid Crystal Display // *Journal of Display Technology.*– 2009.– № 5. – С. 355–357.

20. *Lin C.Y., Lee K.L., Tsai P.Y., Chen J.W.* Design of Directional Light Source for Blue Phase LCD // *Proc. SPIE9272, 927205.*– 2014.

21. *Woods A.J.* How are crosstalk and ghosting defined in the stereoscopic literature // *Proc. SPIE7863, 78630Z.*– 2011.



Шин-Мин Хун, магистр электротехники и информатики (Национальный Технологический Университет города Тайбэй), 2011.

В настоящее время занимается кандидатской диссертацией по электрооптической технике. Область научных интересов: проектирование торцевой подсветки, анализ тенденций отрасли, инновации в проектировании прототипов



Кинг Лиен-Ли, кандидат наук (Национальный Технологический Университет города Тайбэй), 1999.

Профессор электрооптической техники. Область научных интересов: система подсветки, анализ тенденций в отрасли, инновации в проектировании прототипов



Че-Ен Лин, магистр электрооптической техники (Национальный Технологический Университет города Тайбэй), 2015.

Область научных интересов: проектирование модуля подсветки и оптимизация устройства



Меи-Вен Чен, магистр электрооптической техники (Национальный Технологический Университет города Тайбэй), 2018.

Область научных интересов: проектирование модуля подсветки и оптимизация устройства



Джин-Джей Ву, кандидат наук в области электротехники (Национальный Университет Цзяотун), 1989.

Профессор электрооптической техники в Национальном Технологическом Университете города Тайбэй. Имеет более 20 лет опыта в улучшении жидкокристаллических дисплеев

Световая среда и воспринимаемая среда¹

Б. МАНАВ

Стамбульский университет Айвансарай, Стамбул, Турция
E-mail: banumanav@ayvansaray.edu.tr; manav.banu@gmail.com

Аннотация

При проектировании освещения главной задачей является обеспечение здоровых условий окружающей среды, что связано с рассмотрением вопросов энергоэффективности, стоимости, технического обслуживания и качества. Применительно к архитектурным объектам и интерьерам следует использовать ориентированные на потребителя осветительные установки. Очень важное значение имеет обеспечение потребителя возможностью управления освещением в части изменения освещённости и цвета освещения, что позволяет изменять атмосферу внутри помещения и влиять на настроение потребителя. Стандарты и нормы освещения следует оценивать с учётом этих обстоятельств. В статье предпринята попытка анализа влияния световой среды на восприятие человеком окружающего пространства. Для этого проведено рассмотрение результатов нескольких экспериментальных исследований применительно к оценке и проектированию световой среды.

Ключевые слова: световая среда, восприятие пространства, стандарты на освещение, внутреннее освещение.

1. Введение

Рассмотрение перехода от световой среды к воспринимаемой среде охватывает много вопросов, связанных с качественными и количественными характеристиками освещения. В [1] процитировано мнение Каттла (*Cuttle*, 2003), что световая среда преобразуется в изображение на сетчатке, которое стимулирует зрительный процесс, обеспечивающий получение информации, позволяющей воспринимать и распознавать объекты и поверхности, формирующие зрительный образ воспринимаемой среды.

Это утверждение подчёркивает важность таких измеряемых величин, как средняя освещённость на горизон-

тальной или вертикальной поверхности или распределение яркости по поверхности стены, которые обеспечивают простейшее восприятие окружающей среды. Однако реакция на непосредственное окружение включает в себя и не визуальное воздействие света², которое можно отнести к восприятию более высокого уровня [1], обусловленное долгосрочными впечатлениями (после длительного нахождения в условиях соответствующей окружающей среды). Этот процесс существенно зависит от наших знаний, предыстории и опыта. При проведении исследований часто используются корреляционные методы, позволяющие оценить влияние световой среды на восприятие светлоты, цветового облика и яркости.

Проектирование освещения, которое основано на использовании европейских стандартов, таких как *EN12464-1* [2], также следует рассмотреть с учётом упомянутого выше не визуального воздействия света. Критичные для зрительного комфорта параметры, такие как освещённость, яркость и спектральный состав излучения источников света, следует рассмотреть с точки зрения их взаимосвязи не только с восприятием, но и со здоровьем людей [3]. В данной работе с точки зрения восприятия проанализированы последние исследования в области проектирования световой среды.

2. Оценка зрительного комфорта и эмоционального восприятия пространства (*Emotional Space*)

Этот метод призван установить связь между субъективными оценками освещения и результатами светотехнических измерений. В соответ-

² Обычно под не визуальным воздействием света (*non-visual effects of lighting*) понимают только процессы, не связанные со зрительным восприятием (например, выработка мелатонина, изменение циркадных ритмов и т.д.), к которым вряд ли можно отнести «впечатления». – Прим. пер.

ствующих исследованиях сомнения в точности моделирования обусловлены использованием масштабированной модели и компьютерных методов проведения исследований, которые называют «абстрактными условиями» (*abstract conditions*). Большой интерес представляют работы [4, 5], т.к. в них использовались реальные интерьеры и участники. Шкалы, которые использовались применительно ко всем отдельным характеристикам (чёткость восприятия, просторность, упорядоченность (*formality*) и пространственная сложность (*spatial complexity*) помещения), обеспечили возможность оценки влияния освещения на восприятие пространства. Кроме того, в [4, 5] с использованием многомерного масштабирования была проведена оценка результатов, полученных применительно к трёхмерному пространству. А в 1979 г. было проведено исследование нескольких осветительных установок, в результате чего была сформирована карта, на которую в двух измерениях (привлекательность (*interest*) и светлота) были нанесены разные типы офисного освещения, идентифицированные посредством факторного анализа [6]. В результате, для осветительных установок были обозначены области равной предпочтительности.

Все эти односторонние исследования были направлены на оценку влияния «световой среды» на восприятие пространства. В [7] 174 студента старших курсов давали оценку чёткости восприятия, просторности, расслабляющего действия, приватности, приятности и упорядоченности (эти термины относятся к восприятию, для которого определяющим является освещение). Помещение без естественного освещения, в котором общее освещение трубчатыми люминесцентными лампами (ТЛЛ) (5400 К) обеспечивало среднюю освещённость $E_{av} = 270$ лк, было признано просторным и чётко воспринимаемым. Подсветка лампами накаливания, обеспечивавшими $E_{av} = 110$ лк, было признано предпочтительным с точки зрения приятности, приватности и расслабляющего действия. Освещение стен, которое осуществлялось ТЛЛ (5400 К), обеспечивавшими $E_{av} = 300$ лк, улучшало чёткость восприятия и ощущение упорядоченности. Участники лучше себя чувствовали при освещении тёплым светом. Однако в этом исследовании не задавались вопросы, непосредственно

¹ Перевод с англ. Е.И. Розовского

связанные с оценкой цветового облика окружающих объектов/предметов.

Описанные в [8] исследования, проводившиеся применительно к освещению офисов, были направлены получение субъективных сравнительных оценок коррелированной цветовой температуры (КЦТ) (2700 и 4000 К) и освещённости (500, 750 и 1000 лк). Полученные результаты говорят о том, что изменения КЦТ и освещённости влияют на зрительную привлекательность пространства. На рис. 1 проведено сравнение этих результатов с графиком Круитхофа (*Kruithof*) 1941-го года (рис. 1а) и модифицированным графиком Круитхофа [9] (рис. 1б). В обоих случаях оказалось, что при всех трёх уровнях освещённости (500, 750 и 1000 лк) 4000 К оказались предпочтительнее, чем 2700 К. Что касается работы [8], то в ней 4000 К были признаны предпочтительными по сравнению с 2700 К применительно к комфортабельности и просторности, тогда как применительно к расслаблению, светлоте и насыщенности предпочтительными были признаны 2700 К.

При рассмотрении привлекательности пространства следует учитывать как энергоэффективность и мощность осветительной установки, так и эмоциональную составляющую и общее впечатление от пространства. Соответствующее исследование описано в [10, 11], где проведено сравнение энергетических характеристик (количественные данные) и зрительного комфорта (качественные данные) при освещении трубчатыми светодиодными лампами (ТСДЛ) (мощность = 36 Вт, световой поток = 3300 лм, световая отдача = 92 лм/Вт, КЦТ = 3800

К, освещённость на рабочей поверхности = 570 лк) и ТЛЛ (мощность = 20 Вт, световой поток = 1600 лм, световая отдача = 80 лм/Вт, КЦТ = 4100 К, освещённость на рабочей поверхности = 577 лк). Восприятие пространства оценивалось с использованием следующих прилагательных: просторный, широкий, воздушный, способствующий отдыху (расслабляющий). Анализ количественных и качественных данных, проведённый с использованием пакета программ обработки статистических данных *SPSS17*, не выявил никаких существенных отличий между рассмотренными вариантами освещения.

В [12], где было проведено сравнение графика Круитхофа с экспериментальными данными других авторов, отмечается, что хотя график Круитхофа широко используется при проектировании, результаты исследований, проводившихся после 1990-го г. в связи с внедрением новой техники, противоречат данным Круитхофа, и если избегать низких уровней освещённости, то приятные условия реализуются при любой КЦТ.

В данной работе рассмотрены два варианта графика Круитхофа, на которые нанесены результаты, полученные автором и её коллегами (рис. 1). На рисунках видно, что эти варианты отличаются друг от друга. Например, комбинация «3800 К, 570 лк», которая в вышеупомянутом исследовании была признана производящей положительное субъективное впечатление, на модифицированном графике Круитхофа также лежит в области «приятное освещение», тогда как на графике Круитхофа 1941-го года она лежит

в области «цвета выглядят неестественными».

Если на график Круитхофа нанести и другие результаты, полученные в [7, 8, 10, 11], то также можно увидеть их отличия от данных Круитхофа. Так, в [8] комбинации «4000 К, 500 лк», «4000 К, 750 лк» и «4000 К, 1000 лк» воспринимались как комфортные и просторные, т.е. при краткосрочном восприятии окружающей среды они оценивались положительно. И хотя на графиках Круитхофа точно такие же субъективные оценки отсутствуют, эти результаты всё же можно сопоставить с данными Круитхофа. Как видно на рис. 1, на графике Круитхофа 1941-го года комбинация «4000 К, 500 лк» лежит в области комфортного освещения, тогда как комбинации «4000 К, 750 лк» и «4000 К, 1000 лк» лежат в области «цвета выглядят неестественными». При этом на модифицированном графике Круитхофа в области «приятное освещение» лежат все три упомянутые комбинации, что согласуется с [8].

График Круитхофа служит инструментом для оценки комбинаций КЦТ и освещённости, давая общее представление об обеспечиваемом ими впечатлении. Он полезен, т.к. говорит о существовании связи между КЦТ и освещённостью при оценке эмоционального восприятия пространства. Соответствующие субъективные оценки не ограничиваются только категориями «приятный» и «цвета выглядят тусклыми или холодными», которые рассмотрены в [4–8, 10, 11, 17, 19]. Даже сегодня новые направления в области проектирования освещения вынуждают нас учитывать и иные моменты, такие как использование регулируемых СД источников белого света, освещённость на сетчатке глаза и её влияние на циркадные ритмы, а также влияние длины волны излучения на функционирование организма человека.

3. Современное освещение

Сегодня, независимо от предназначения здания, мы всегда стараемся обеспечить хорошо спроектированное и должным образом освещённое внутреннее пространство, которое было бы «приятным» и в котором мы бы чувствовали себя «комфортно». Прийти к единому мнению относительно таких параметров, как чёткость вос-

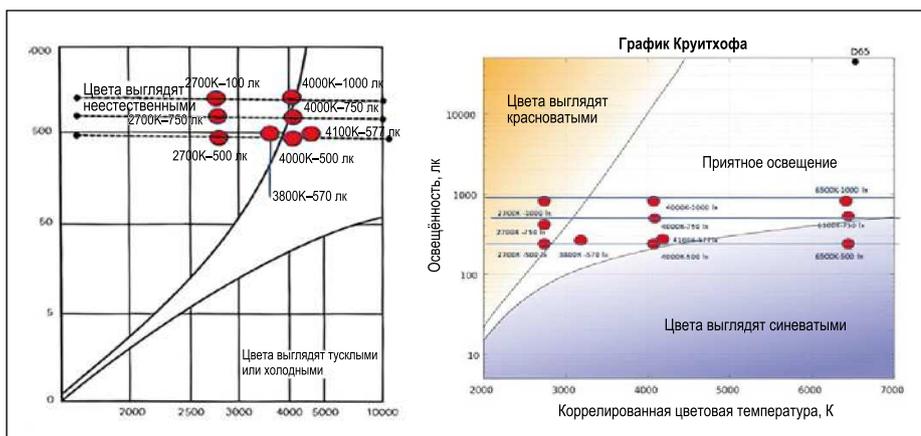


Рис. 1. Оценка условий обеспечения зрительного комфорта на основе графика Круитхофа (*Kruithof*) 1941-го года (а) и модифицированного графика Круитхофа [9] (б)

приятия, расслабляющее действие, просторность, приватность, которые относятся к субъективным оценкам, довольно трудно, но при этом существуют статистические методы обработки результатов исследований и проведения оценок.

С начала 21-го века к субъективным оценкам добавились новые факторы, такие как связь между освещением и здоровьем, ориентированное на людей освещение и циркадные ритмы. Попадающие в наши глаза лучи света не только обеспечивают возможность видеть, но и влияют на протекающие в организме человека гормональные процессы и физиологические ритмы.

Хорошо известное определение циркадного ритма (установление внутреннего копирования чередования дня и ночи) и влияние циркадного механизма на передачу информации о «внутреннем» времени ко всем частям тела подтверждают наличие не визуального воздействия света [13]. В темноте, то есть при отсутствии света, внутренние сигналы организма продолжают поступать, но их периодичность превышает 24 ч [14–16]. Для приведения внутренних часов к 24-часовому периоду необходимо внешнее воздействие. Однако его нелегко обеспечить незамедлительно. Освещённость может и не обеспечить поступление к внутренним часам сигнала о необходимости регулировки спектральной чувствительности фоторецепторов сетчатки. А это может привести к нарушениям метаболизма человека. Воздействию подвергаются и циклы сна-бодрствования, и гормональная активность, и дневная активность, и иммунная система, что может привести к серьёзным заболеваниям. При формировании зрительно комфортного и здорового пространства проектировщик освещения должен учитывать все эти факторы.

Проектирование внутреннего освещения с учётом требований зрительного комфорта обычно осуществляется на основе стандарта *EN12464-1* [2], область применения которого охватывает искусственное освещение. Этот стандарт содержит полезную информацию по выбору размеров и конфигурации установок искусственного освещения. Он позволяет задать средние освещённости на горизонтальных и вертикальных поверхностях и значения объединённого показателя дис-

комфорта и спроектировать расположение светильников.

Результаты проведённых исследований говорят о том, что при проектировании освещения следует учитывать его качество, зависящее от цветовых характеристик источников света и психологии человека, а также от эстетических, социальных и культурных факторов. Но проектирование освещения – это нечто большее, так как освещение влияет на гормональную активность, самочувствие, иммунную систему и работоспособность человека [3, 13–15, 17, 19].

В 2002 г. Дэвид Берсон (*David Berson*) открыл новый фоторецептор сетчатки глаз млекопитающих, и мы узнали, что качество освещение включает в себя не только зрительное воздействие. Попадающий на сетчатку свет служит основным синхронизатором циркадных ритмов. Как показали исследования последних лет, существуют нервные связи между колбочками и палочками глаза и зрительной зоной коры головного мозга. Чувствительности колбочек и палочек зависят как от длины волны, так и от цвета света. Согласно кривым спектральной чувствительности глаза, глаз человека не воспринимает длинноволновое красное и коротковолновое синее излучение. Максимальная чувствительность глаза лежит в зелёно-жёлтой области спектра. Исследования показали, что чувствительность глаза не совпадает с биологическим спектром действия. Чувствительность нового фотоприёмника зависит от длины волны (т.е. от цвета света).

Если рассмотреть связь между спектром излучения и физиологией человека, то видно, что чувствительность зрительного аппарата имеет максимум в зелёно-жёлтой области спектра, тогда как максимум биологической чувствительности лежит в синей области спектра. Это отличие следует учитывать при проектировании освещения, т.к. оно непосредственно связано с не визуальным воздействием света.

Высококачественные осветительные установки должны не только обеспечивать видимость, но и формировать зрительный облик пространства [16–18]. Продолжаются исследования в области объединённого показателя дискомфорта (*UGR*) и вероятности зрительного комфорта (*Visual Comfort Probability (VCP)*). СД

и/или иным источникам света с высокой КЦТ (с большим содержанием коротковолнового излучения) присуща относительно большая блёскость. Новейшие исследования показали, что спектральная чувствительность к блёскости отличается от функции относительной спектральной световой эффективности зрительной системы человека ([16] со ссылками на работы *Fekete et al* (2009) и *Wördenweber et al* (2007)). Это обстоятельство вынуждает ввести понятие «циркадный стимул» (*Circadian Stimulus (CS)*), который эквивалентен относительному подавлению выработки мелатонина после 1-часового воздействия излучения источника света.

При проектировании освещения важно учитывать зависимость требований к освещённости как от зрительной задачи, так и от спектра света и экспозиции при воздействии конкретного иллиуминанта. В последние годы было достигнуто согласие относительно оценки света, попадающего на роговую оболочку глаза. Два источника света могут иметь одну и ту же КЦТ и при этом обеспечивать разные значения циркадного стимула. Это расхождение обусловлено несовпадением их спектров излучения. Согласно [20], можно считать, что источникам света с высокими значениями КЦТ, такими как 5000–6500 К, обычно будут соответствовать высокие значения циркадного стимула, хотя иногда источник света с КЦТ, равной 3500 К, будет обеспечивать более высокий циркадный стимул, чем источник света с КЦТ, равной 3000 К.

Другой важной особенностью проектирования освещения с учётом циркадных стимулов является расчёт освещённости на роговице глаза E_v . Эта вертикальная освещённость так же важна, как и горизонтальная освещённость. Значения освещённости рассчитывают применительно к используемым светильникам, что позволяет выбрать наиболее подходящий тип светильника. На рабочих местах предпочтительно использовать совокупность светильников прямого и отражённого света [21]. Любое решение, позволяющее улучшить зрительные возможности в части обеспечения субъективного ощущения бодрости, следует развивать и применить на практике. Используемые в проекте освещения изделия могут представлять собой прикрепленные к мебели осветитель-

ные приборы (светящиеся офисные перегородки) или устанавливаемые на полу осветительные приборы, такие как световые короба, или подвесные потолки с покрытиями компании *Barrisol* с автоматической системой управления.

Другой важный момент связан с освещением, учитывающим возрастные особенности человеческого организма и отвечающим потребностям соответствующих пользователей. При проектировании освещения следует принимать во внимание как нарушения зрения, так и циркадные стимулы. Посвящённые этому вопросу отчёты Светотехнического исследовательского центра (*Lighting Research Center*³) говорят о важности освещённости и спектра излучения как в дневное, так и в ночное время. Согласно [21], в дневное время обеспечение на глазе в течение 2-х часов сочетания 400 лк и 6500 К или 550 лк и 2700 К достаточно для того, чтобы циркадный стимул достиг уровня 0,3–0,4, тогда как в ночное время обеспечение на глазе в течение 2-х часов сочетания 50 лк и 2700 К приводит к доведению циркадного стимула до уровня 0,1.

Эксперименты, проводившиеся в период с 1970-х годов до настоящего времени, и их научно обоснованные результаты демонстрируют влияние искусственного освещения на работоспособность и самочувствие людей [23–26]. Однако никогда не следует забывать о важности естественного освещения, которое должно быть включено в общую систему освещения. Применительно к связанным с освещением психологическим и физиологическим моментам, наилучшим является естественный свет. Следует всегда помнить о спектре естественного излучения и его влиянии на людей и необходимости учитывать их при проектировании.

4. Обсуждение

В [26] приведены спектральные чувствительности фоторецепторов сетчатки, позволяющие оценить условия освещения применительно к их способности обеспечить невизуальное воздействие на людей. Хотя измерение не связанного с формированием изо-

бражения невизуального воздействия света на людей представляется затруднительным, в последнее время в этой области были достигнуты некоторые успехи. Так, в [26] отмечалось, что так как СД с фиолетовыми кристаллами (*vLED*) способны имитировать естественный свет, то они подходят для пространств и объектов, для которых приоритетным является цвет. При этом СД с фиолетовыми кристаллами придают цветам синеватый оттенок. Кроме того, в [27] предлагают использовать СД с фиолетовыми кристаллами при решении проблем энергоэффективности в условиях дневного зрения. При одинаковом значении КЦТ СД с фиолетовыми кристаллами обеспечивают большее, чем СД с синими кристаллами (*bLED*), значения отношения *S/P*.

Успехи в области техники приводят к новым решениям в области освещения. Ориентированное на потребности людей освещение, включающее в себя осветительные установки с автоматическим управлением, настраиваемое освещение и ориентированные на потребителей проектные решения, реализуется и в архитектуре, и в интерьерах.

В [10, 11] проведено сравнение энергетических характеристик (количественные данные) и зрительного комфорта (качественные данные) при освещении ТЛЛ и ТСДЛ. Измерение и расчёт уровня и равномерности распределения освещённости, потребляемой мощности, полного коэффициента гармонических искажений и коэффициента мощности в случаях ТЛЛ и ТСДЛ позволили провести количественное сравнение двух осветительных установок. Качественные характеристики определялись применительно к выполнению зрительных задач, связанных с оценкой создаваемого помещением впечатления и восприятием изменений системы освещения. Полученные результаты говорят о том, что с точки зрения качества освещения ТСДЛ не отличаются от ТЛЛ. Данные об освещённости, блёскости и зрительном облике демонстрируют отсутствие отличий зрительного восприятия при использовании ламп этих двух типов. С другой стороны, использовавшиеся в этих полевых испытаниях ТСДЛ позволяют экономить 22,8 % электроэнергии, причём неизбежное совершенствование СД может привести к тому, что эта экономия

превысит 60 %. Влияние СД на циркадные стимулы следует исследовать в аналогичных условиях с последующим анализом полученных результатов с точки зрения здоровья людей.

5. Заключение

Связь между стимулами (световая энергия) и восприятием рассматривали многие учёные. Так как восприятие световой среды зависит от адаптации зрительной системы человека к непосредственно окружающей его среде и различиями между наблюдателями, то эти факторы необходимо учитывать при проектировании освещения. Простейшее восприятие (непосредственная реакция), например, освещённости, светлоты, цветового облика, связано со световой средой, тогда как восприятие более высокого порядка (просторность, пространственная сложность, чёткость восприятия и др.) является более комплексным и предполагает наличие более тонких связей.

Применительно к реакции людей на условия освещения можно сформулировать следующие рекомендации:

- При проектировании освещения следует рассматривать не только горизонтальную (E_h), но и вертикальную (E_v) освещённость и проектировать освещённость не только на горизонтальных, но и на вертикальных поверхностях. При этом необходимо проектировать и контролировать распределение света в пространстве.

- Следует принимать во внимание яркость и яркостный контраст (должно быть обеспечено не только общее, но и рабочее освещение), контролировать зеркальные отражения и учитывать тени, и при этом следует избегать появления отвлекающих внимание глубоких теней.

- Одной только КЦТ источника света недостаточно – следует учитывать ещё и спектральное распределение энергии излучения источника света. Следует планировать цветовые характеристики поверхностей, так как применительно к остроте зрения важное значение имеет цветовой контраст.

- Следует контролировать мелькания, которые влияют на зрительное восприятие и остроту зрения.

Главной задачей должно быть обеспечение здоровых условий окружающей среды, что связано с рассмотрением вопросов энергоэффективности,

³ Одно из подразделений Ренсселерского политехнического института, г. Трой, США. – Прим. пер.

стоимости, технического обслуживания и качества. Применительно к архитектурным объектам и интерьерам следует использовать ориентированные на потребителя осветительные установки. Для обеспечения как зрительно комфорта, так и функционирования циркадной системы, важное значение имеет предоставление потребителям возможности управления освещением. Уменьшая или увеличивая световой поток, можно настраивать атмосферу внутри помещения. Изменяя цвет и/или распределения света, можно влиять на настроение потребителей или, другими словами, на восприятие пространства. При проектировании освещения следует учитывать и его влияние на циркадные процессы.

Помимо прочего, необходимо учитывать и стоимостные соображения, останавливаясь на дешёвых и эффективных решениях. Другим важным фактором, который следует учитывать при проектировании, является включение цвета света в цветовую концепцию интерьера. Например, в офисах перегородки и/или рабочие места можно сделать самосветящимися и проектировать при этом цвет освещения. Красные перегородки могут не вызывать подавление выработки мелатонина, так как для этого требуется 6500 К.

Никогда не следует забывать о важности естественного освещения, которое всегда должно быть главной задачей при проектировании. Однако в определённых случаях, особенно при отсутствии естественного света, всегда следует принимать во внимание человеческие факторы, зрительный комфорт и качество освещения. Качественные характеристики освещения должны быть обозначены и включены в стандарты на освещение, такие как [22–24]. В освещение следует внедрять обусловленные техническим прогрессом достижения в таких областях, как системы автоматического управления, ориентированное на людей освещение, настраиваемое освещение и управление циркадными ритмами. Проектировщик освещения должен выдавать решения, обеспечивающие удовлетворительную светлоту в рабочей зоне, подчёркивая при этом архитектурных детали и особенности интерьера для выделения зрительно привлекательных участков.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Boyce, P.* Human factors in lighting, 2nd Ed. Lighting Research Center, London: Taylor and Francis, 2003.
2. European Committee for Standardization. Light and lighting, lighting of work places. Part 1. EN12464-1. Brussels: Indoor Work Places; 2004
3. *van den Beld, G.J., van Bommel, W.* Lighting for work: visual and biological effects // *Lighting Research and Technology*.– 2004. DOI:10.1191/1365782804li122oa
4. *Flynn, J.E., Hendrick, C., Spencer, T., Martyniuk, O.* Interim Study of Procedures for Investigating the effect of Light on Impression and Behavior // *Journal of Illuminating Engineering Society*.– 1973. – No. 3. – P. 87–94.
5. *Flynn, J.E., Hendrick, C., Spencer, T., Martyniuk, O.* A Guide to Methodology Procedures for Measuring Subjective Impressions in Lighting // *Journal of Illuminating Engineering Society*.– 1979. – No. 8. – P. 95–110.
6. *Hawkes, R., Loe, D., Rowlands, E.* A Note Towards the Understanding of Lighting Quality // *Journal of Illuminating Engineering Society*.– 1979. – No. 8. – P. 111–120.
7. *Manav, B., Yener, C.* Effects of Different Lighting Arrangements on Space Perception // *Architectural Science Review*.– 1999. – Vol. 42, No. 1. – P. 43–47.
8. *Manav, B.* An experimental study on the appraisal of the visual environment at offices in relation to colour temperature and illuminance // *Building and Environment*.– 2007. – Vol. 42, No. 2. – P. 979–983.
9. *Ashdown, I.* The Kruithof Curve: A Pleasing Solution, Research Gate, www.agi32.com/blog-2015/01/12.
10. *Manav, B., Erkin, E., Güler, Ö., Onaygil, S.* An experimental study on tubular fluorescent and LED lamps with respect to energy performance and visual comfort // *Light and Engineering*.– 2013. – Vol. 21, No. 4. – P. 50–57.
11. *Гюлер Ё., Манав Б., Онайлил С., Эркин Е.* Экспериментальное сравнение энергетических характеристик и зрительной комфортности люминесцентных и светодиодных трубчатых ламп // *Светотехника*.– 2014. – № 3. – С. 18–23.
12. *Fotios, S.* A Revised Kruithof Graph Based on Empirical Data // *Leukos*.– 2017. – Vol. 13, No. 1. – P. 3–17. Doi:10.1080/15502724.2016.1159137.
13. *Huiberts, L.M., Smolders, K.C., de Kort, Y.A.* Shining light on memory: effects of bright light on working memory performance // *Behavioural Brain Research*.– 2015. – Vol. 294, No. 11. – P. 234–245.
14. *Dai, Q., Cai, W., Shi, W., Hao, L., Wei, M.* A proposed lighting-design space: Circadian effect versus illuminance // *Building and Environment*.– 2017. – Vol. 122, No. 9. – P. 287–293.
15. *Bellia, L., Bisegna, F., Spada, G.* Lighting in indoor environments: visual and non-visual effects of light sources with different spectral

power distributions // *Building and Environment*.– 2011. – Vol. 46, No. 10. – P. 1984–1992.

16. CIE205:2013 Review of lighting quality measures for interior lighting with LED lighting systems

17. *Knez, I.* Effects of Colour of Light on nonvisual psychological processes // *Journal of Environmental Psychology*.– 2001. – Vol. 21, No. 2. – P. 201–208.

18. *Brainard, G.C.* Photoreception for regulation of melatonin and the circadian system in humans // 5th Int. LRO lighting research symp. Orlando, 2002.

19. *Veitch, J.A., Newsham, G.R.* Lighting quality and energy-efficient effects on task performance, mood, health, satisfaction and comfort // *Journal of the Illuminating Engineering Society*.– 1998. – Vol. 27, No. 1. – P. 107–130.

20. *Figueiro, M., Gonzales, K., Pedler, D.* Designing with circadian stimulus, //LD+A.– 2016. – No. 10. – P. 31–34.

21. *Figuro, M. et al.* Lighting for visual performance, circadian health and safety in older adults, webinar, Philips Lighting University, 25.01.2018.

22. American National Standard Practice for Office Lighting, Office Lighting Committee of the ESNA, ANSI / IESNA RP-1, 1993.

23. CIBSE, Code for interior lighting, The Chartered Engineers, London, 1984.

24. CIE Standard, Lighting of indoor work places, CIE S008/E-2001, 2001.

25. *Fleischer, S., Krueger, H., Schierz, C.* Effect of brightness distribution and light colours on office staff // The 9th European Lighting Conf. Proceeding Book of Lux Europa 2001, Reykjavik, 2001, pp.77–80.

26. CEN/TR16791:2017/E Quantifying Irradiance for Eye-Mediated Non-Image-Forming Effects of Light in Humans.

27. *Koga, Y., Yamakawa, M.* Potential Non-Image-Forming Visual Effects of Violet-LED and Blue-LED White Light Sources // Proceeding Book of BalkanLight, 2018, pp:17–21.



Бану Манав (Banu Manav), Ph. D., профессор. Окончила Билкентский университет, Турция. Декан и руководитель отделения архитектуры интерьеров и проектирования вну-

тренних пространств факультета искусства, дизайна и архитектуры Стамбульского университета Айвансарай. Член правления Турецкой национальной комиссии по освещению. Научные интересы: внутреннее освещение, восприятие пространства, зрительный комфорт и восприятие цвета

BL
Group



Международная
светотехническая
корпорация



БООС ЛАЙТИНГ ГРУПП



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

СВЕТЛЫЕ РЕШЕНИЯ ДЛЯ УМНОГО ГОРОДА



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

Исследование характеристик светодиодов для фитооблучателей

М.М. ЕРОХИН^{1,2}, П.В. КАМШИЛОВ^{1,3}, В.Г. ТЕРЕХОВ^{1,3}, А.Н. ТУРКИН^{2,3}

¹ ВНИСИ им. С.И. Вавилова, Москва

² МГУ им.М.В.Ломоносова, физический факультет, Москва

³ НИУ «МЭИ», Москва

⁴ E-mail: andrey@turkin.su

Аннотация

Проведены комплексные исследования светодиодов (СД) красного, зелёного и синего света, широко используемых в фитооблучателях для выращивания растений в предприятиях закрытого грунта в условиях светокультуры, включающие в себя измерения спектров излучения красных, зелёных и синих СД в широком диапазоне значений тока при комнатной температуре. Выявлены сдвиги спектральных максимумов излучения красных и зелёных светодиодов при увеличении рабочего тока. На основе результатов проведённых исследований выработаны рекомендации по выбору рабочего режима источников света, используемых в фитооблучателях для выращивания растений в условиях светокультуры, а также предложена модель фитооблучателя с исследованными в данной работе красными, зелёными и синими СД, излучение которых охватывает все области фотосинтетически активной радиации (ФАР).

Ключевые слова: светодиод, СД, фитооблучатель, предприятие закрытого грунта, теплица, светокультура растений.

1. Введение

Оптическое излучение всё в большей степени используется в современных технологических процессах в промышленности и сельском хозяйстве, становится неотъемлемой частью химических производств, играет важную роль в животноводстве, птицеводстве и тепличном растениеводстве [1–3].

Воздействие излучения видимой части спектра на растения исследовалось многими авторами (см., например, [3, 4]). В [4] исследовали влияние освещённости и спектрального состава излучения на эффективность фотосинтеза и продуктивность различных растений, у которых за поглощение света отвечают специальные пигменты, такие как хлорофилл *a* и хлорофилл *b*, каротиноиды и прочие. Хлорофиллы поглощают свет синего и красного спектрального диапазонов, а каротиноиды – синего и зелёного диапазонов. Энергия излучения, поглощаемая различными пигментами, расходуется на развитие корневой системы, созревание плодов, цветение растений и т.д. Остальные части спектра, за исключением янтарного, растениями практически не используются [3, 5, 6].

Парниковые или тепличные фермы – это далеко не новые технологии, но в условиях постоянно растущего населения земного шара и стремления к стабильному, высокоэффективному и стандартизированному производству продуктов питания они станут нормой в будущем, открывая новый огромный сектор агропромышленности. Одним из наиболее важных достижений, определивших

будущее предприятий закрытого грунта и целесообразность их строительства, стало бурное развитие светодиодных технологий [3]. Современные светодиоды (СД) позволяют создавать осветительные и облучательные приборы с требуемым спектральным составом излучения, будучи при этом чрезвычайно устойчивыми к жёстким условиям окружающей среды и относительно небольшими по физи-

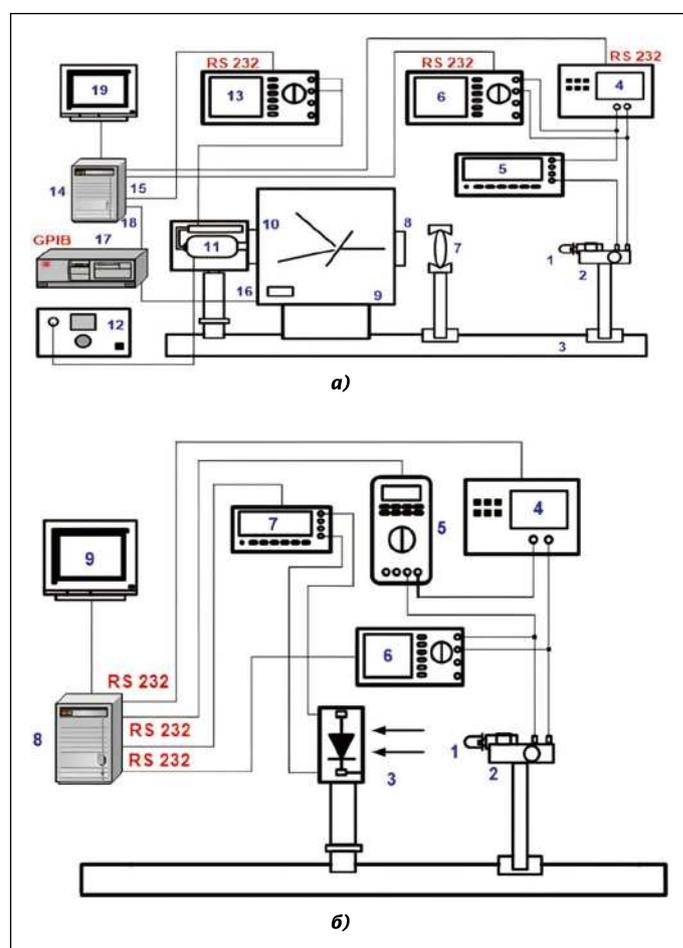


Рис. 1. Схема экспериментальной установки:
а – Установка для измерения спектров излучения СД
1 – СД, 2 – регулируемый держатель СД, 3 – оптическая скамья, 4 – источник питания, 5 – амперметр, 6 – вольтметр, 7 – коллимационная линза, 8 – входная щель, 9 – призменный монохроматор SPM-2, 10 – выходная щель, 11 – ФЭУ, 12 – блок питания ФЭУ, 13 – вольтметр, 14 – блок управления, 15 – порт управления, 16 – шаговый двигатель, 17 – компьютер, 18 – порт управления шаговым двигателем, 19 – монитор;
б – Установка для измерения зависимости потоков излучения СД от тока
1 – СД, 2 – регулируемый держатель СД, 3 – фотоприёмник, 4 – источник питания, 5 – амперметр, 6 – вольтметр, 7 – блок управления, 8 – компьютер, 9 – монитор

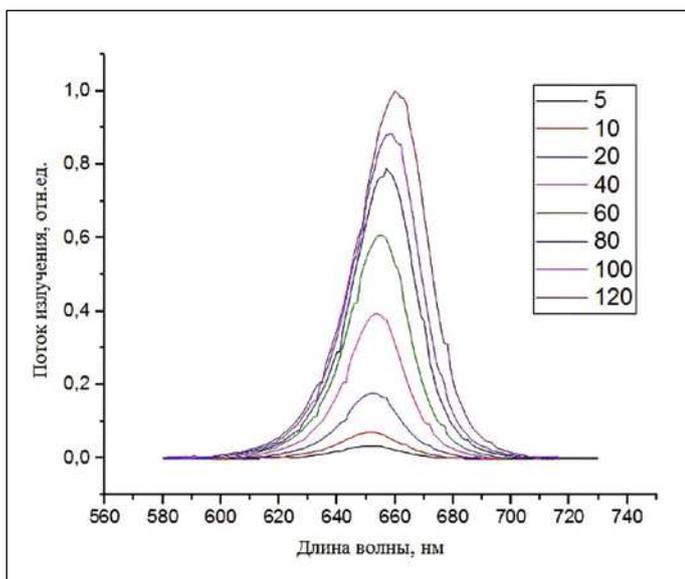


Рис. 2. Типичные спектры красных СД при разных значениях тока (цифры на рисунке соответствуют силе тока в мА)

ческим размерам по сравнению с другими осветительными и облучательными приборами. Кроме того, они имеют значительно большие сроки службы, отличаются низкими рабочими напряжениями и характеризуются сравнительно небольшими тепловыми потерями [7].

Целью данной работы является формирование базы для выбора СД, предназначенных для использования в фитооблучателях для выращивания растений в предприятиях закрытого грунта в условиях светокультуры. Для достижения этой цели была поставлена задача исследования спектральных характеристик СД красного, зелёного и синего света, объяснение особенностей поведения этих спектральных характеристик, а также моделирование фитооблучателя с охватывающим всю область фотосинтетически активной радиации (ФАР) и, что не менее важно, управляемым спектром излучения.

Данные исследования представляют одно из направлений, принятых в настоящее время, которое основывается

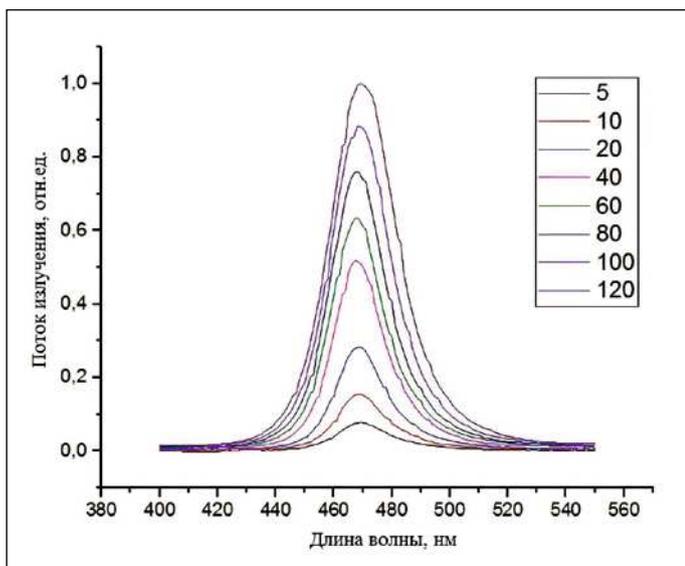


Рис. 4. Типичные спектры синих СД при разных значениях тока (цифры на рисунке соответствуют силе тока в мА)

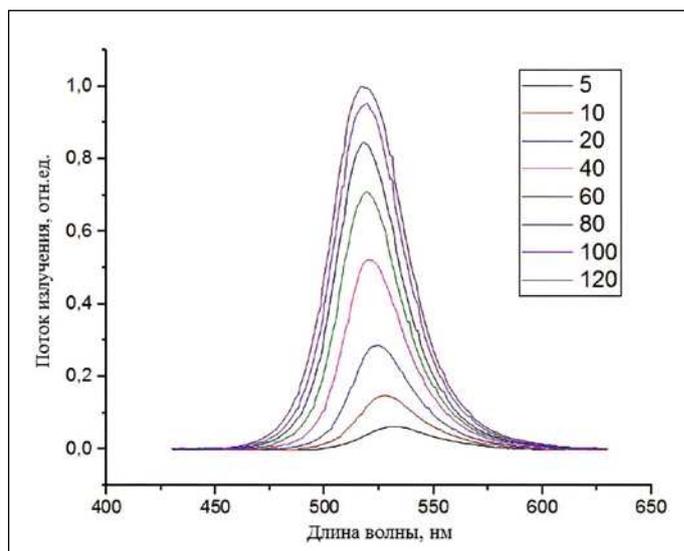


Рис. 3. Типичные спектры зелёных СД при разных значениях тока (цифры на рисунке соответствуют силе тока в мА)

на использовании цветных (монокроматических) СД для применения в фитооблучателях. С этим связан выбор для исследований образцов трёх диапазонов длин волн – синего, зелёного и красного цвета.

2. Методика эксперимента

Исследования характеристик СД красного, зелёного и синего света производились с использованием автоматизированной экспериментальной установки на основе монохроматора *SPM-2*. Эта установка, схема которой приведена на рис. 1, позволяет производить измерения спектров излучения СД в широком диапазоне токов, а также зависимости потоков излучения СД от тока. Объектами исследований при этом являлись СД красного, зелёного и синего света, кристаллы которых были выращены методами газовой эпитаксии из металлоорганических соединений. Размер кристалла в исследуемых СД составляет примерно 0,350 мм × 0,350 мм. Кристаллы монтировались в отражатель металлического основания, площадь которого составляет порядка 1,0 см². Применение такого основания снижает тепловое сопротивление СД и создаёт возможность для повышения рабочих токов. Конструкция основания предусматривает металлические выводы для монтажа и электрическое соединение СД. Пространство отражателя заполняется оптическим гелем на основе полимерного материала, что улучшает коэффициент вывода излучения из кристалла. Сверху корпус СД закрывается линзой из поликарбоната, которая позволяет формировать кривую светораспределения с углом порядка 30°. Оптический гель образует вокруг кристалла среду, которая не создаёт на него большую механическую нагрузку и допускает небольшие деформации из-за теплового расширения. Это позволяет повышать значение предельного тока через кристалл небольшого размера до рассмотрения других типов 150 мА. При этом конструкция и технология изготовления исследуемых СД является достаточно типичной для данного вида, что позволяет использовать полученные результаты в качестве основы для рассмотрения других типов СД.

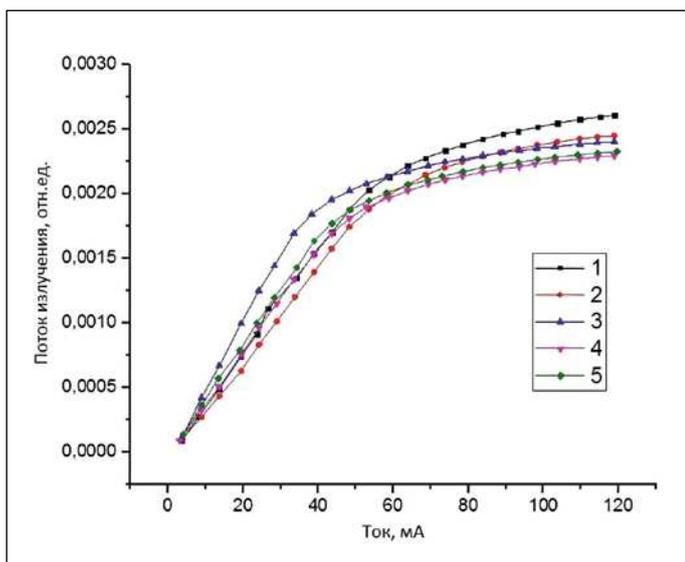


Рис. 5. Зависимости потоков излучения красных СД от тока (цифры на рисунке соответствуют номерам образцов)

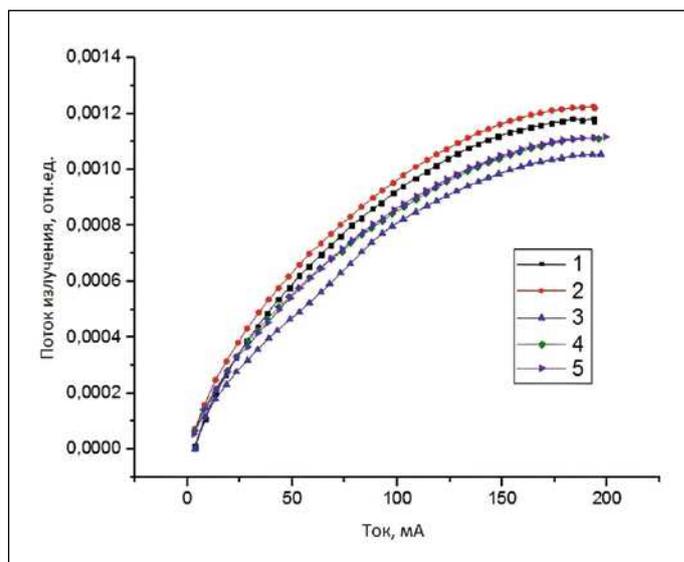


Рис. 6. Зависимости потоков излучения зелёных СД от тока (цифры на рисунке соответствуют номерам образцов)

3. Экспериментальные результаты

В процессе работы были проведены измерения спектров излучения исследуемых СД при разных значениях тока в диапазоне от 5 до 120 мА, типичные примеры которых приведены на рис. 2–4.

У красного СД (рис. 2) при увеличении тока можно наблюдать сдвиг положения максимума относительного спектрального распределения потока излучения в длинноволновую область спектра примерно на 20 нм – из области, приблизительно соответствующей длине волны 650 нм, в область, соответствующую длине волны 670 нм. Подобный сдвиг является характерным для структур на основе фосфида галлия и его твёрдых растворов, излучающих красный и жёлтый свет [8].

У зелёного СД (рис. 3) также наблюдается сдвиг положения максимума с увеличением тока. В этом случае сдвиг происходит в коротковолновую область спектра примерно на 10 нм – из области длин волн, приблизительно соот-

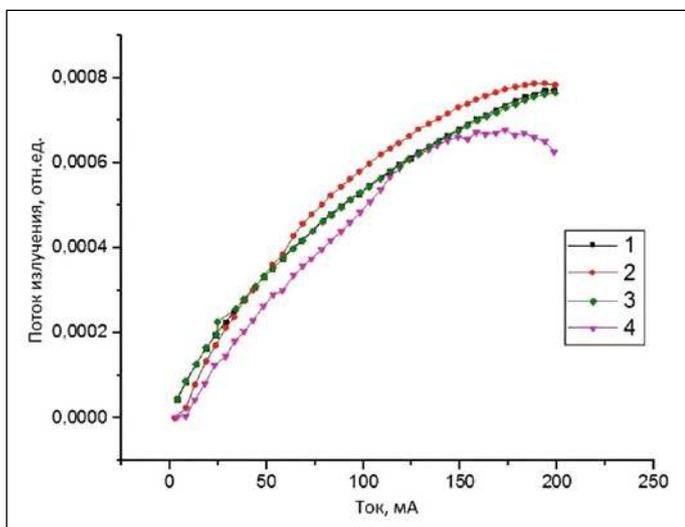


Рис. 7. Зависимости потоков излучения синих СД от тока (цифры на рисунке соответствуют номерам образцов)

ветствующей длине волны 530 нм, в область, соответствующую длине волны 520 нм. Подобный сдвиг положения максимума спектра излучения является достаточно характерным для гетероструктур на основе нитрида галлия и его твёрдых растворов, излучающих зелёный свет [9–12].

В спектре синего СД (рис. 4) с ростом тока сдвиг положения максимума практически не наблюдается: при всех рассмотренных значениях тока длина волны максимума спектрального распределения потока излучения находится в области, приблизительно соответствующей длине волны 470 нм. Отсутствие сдвига длины волны максимума спектрального распределения потока излучения с увеличением тока для кристаллов на основе нитрида галлия и его твёрдых растворов, излучающих синий свет, также является достаточно характерным [9–12].

Отсутствие сдвига положения максимума спектрального распределения потока излучения синих СД при увеличении тока может быть связано с более однородной структурой активной области кристаллов синих СД в связи с меньшей концентрацией индия, и, как следствие, меньшей зависимостью энергии рекомбинации носителей от температуры.

На графиках зависимости потока излучения СД от тока (рис. 5–7) видно, что для красных СД (рис. 5) при токах, меньших чем 35–40 мА, наблюдается линейное увеличение потока излучения при увеличении тока. При дальнейшем увеличении тока, примерно до 60 мА, продолжает наблюдаться увеличение потока излучения, но при этом скорость роста потока излучения снижается. При токах, больших чем 70–80 мА, при увеличении тока рост потока излучения постепенно прекращается, и графики зависимости потока излучения от тока выходят на насыщение при токе порядка 120 мА или выше.

Аналогичный характер зависимости потока излучения от тока наблюдается для зелёных (рис. 6) и синих (рис. 7) СД. При значениях тока, меньших чем примерно 35 мА, зависимости потоков излучения зелёных СД от тока также можно приблизительно аппроксимировать линейной функцией. При дальнейшем повышении тока рост потока излучения начинает замедляться. У зелёных СД насы-

Результаты аппроксимации спектров излучения красных СД

$J, \text{А/см}^2$	$\hbar\omega_{max}, \text{эВ}$	$E_g^*, \text{эВ}$	$E_0, \text{эВ}$	$E_1, \text{эВ}$
5,56	1,906	1,885	0,015	0,021
11,11	1,902	1,893	0,017	0,026
22,22	1,901	1,894	0,015	0,028
44,44	1,898	1,892	0,017	0,027
66,67	1,895	1,888	0,017	0,027
88,89	1,890	1,876	0,018	0,027
111,11	1,885	1,875	0,016	0,030
133,33	1,872	1,858	0,016	0,033

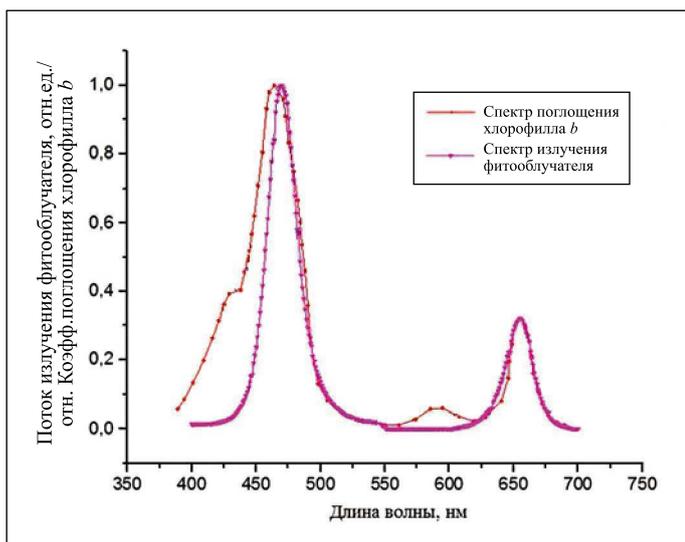


Рис. 8. Спектр поглощения хлорофилла b и смоделированный спектр излучения фитооблучателя

шение потока излучения наблюдается при более высоких, чем у красных СД, значениях тока, равных примерно 125–150 мА.

У синих СД (рис. 7) линейная зависимость потока излучения от тока наблюдается при токах, меньших чем примерно 75–80 мА, тогда как при дальнейшем увеличении тока рост потока излучения начинает плавно замедляться, как и у зелёных светодиодов, и насыщение потока излучения наблюдается у синих светодиодов при значениях тока, превышающих примерно 130–150 мА.

4. Обсуждение экспериментальных результатов

1. Отмеченное выше изменение наклона зависимостей потоков излучения от тока в области больших токов, а именно, при плотности тока, превышающей 130 А/см² для красных СД и превышающей 140 А/см² для зелёных и синих СД, можно объяснить нагревом активных областей СД кристаллов, который приводит к изменению механизмов протекания тока и механизмов рекомбинации носителей в активной области.

2. Для описания основных пиков спектров излучения можно воспользоваться предложенной в [14] аппроксимацией спектров излучения, которую можно представить в виде:

$$I(\hbar\omega) = A_0 \cdot \frac{1 + \exp\left(-\frac{\hbar\omega_{max} - E_g}{E_0}\right)}{1 + \exp\left(-\frac{\hbar\omega - E_g}{E_0}\right)} \times \frac{1 + \exp\left(\frac{\hbar\omega_{max} - (E_g + \Delta F)}{E_1}\right)}{1 + \exp\left(\frac{\hbar\omega - (E_g + \Delta F)}{E_1}\right)}. \quad (1)$$

где $\hbar\omega_{max}$ — энергия максимума спектрального распределения, E_g — ширина запрещённой зоны активной области

кристалла, ΔF — сдвиги энергетических зон (валентной и проводимости) в активной области кристалла, E_0 и E_1 — параметры аппроксимации спектров в длинноволновой и коротковолновой областях соответственно.

Результаты аппроксимации для красных, зелёных и синих СД приведены в табл. 1, 2 и 3 соответственно. При этом значения параметров приведены для нескольких плотностей тока, что делает возможным их использования для сравнения СД с кристаллами разной площади.

Из табл. 1 следует, что при увеличении плотности тока, протекающего через кристалл, у красных СД наблюдается смещение положения максимума излучения $\hbar\omega_{max}$ в сторону более низких энергий, что соответствует наблюдавшемуся в эксперименте сдвигу спектра в длинноволновую область.

Из результатов, представленных в табл. 2, следует, что имеет место смещение максимума излучения зелёных СД в сторону более высоких энергий, что также соответствует наблюдавшемуся в эксперименте сдвигу спектров зелёных СД в коротковолновую область излучения при увеличении плотности тока, протекающего через кристалл. Также можно заметить, что с увеличением плотности тока сдвиг положения максимума уменьшается, и при плотностях тока, больших чем 100 А/см², он практически перестаёт наблюдаться.

Результаты, представленные в табл. 3, говорят о том, что смещение максимума излучения при увеличении плотности тока, протекающего через кристалл, у синих СД не наблюдается, в отличие от красных и зелёных СД. Приведённые результаты расчётов, как и в случаях красных и зелёных СД, соответствуют полученным для синих СД экспериментальным данным.

3. По параметру аппроксимации E_1 можно оценить нагрев структуры. Заметим, что для всех исследуемых СД можно считать $E_1 \approx kT$, что при комнатной температуре составляет примерно 26 мэВ. Таким образом, по результатам аппроксимации спектров излучения при разных токах можно оценить нагрев активной области кристаллов при разных значениях плотности токов.

Результаты аппроксимации спектров излучения зелёных СД

$J, \text{А/см}^2$	$\hbar\omega_{max}, \text{эВ}$	$E_g, \text{эВ}$	$E_0, \text{эВ}$	$E_I, \text{эВ}$
5,56	2,332	2,282	0,048	0,029
11,11	2,350	2,341	0,055	0,030
22,22	2,365	2,361	0,056	0,030
44,44	2,379	2,391	0,058	0,033
66,67	2,387	2,408	0,058	0,035
88,89	2,391	2,401	0,057	0,039
111,11	2,390	2,386	0,057	0,041
133,33	2,390	2,377	0,056	0,046

Таблица 3

Результаты аппроксимации спектров излучения синих СД

$J, \text{А/см}^2$	$\hbar\omega_{max}, \text{эВ}$	$E_g^*, \text{эВ}$	$E_0, \text{эВ}$	$E_I, \text{эВ}$
5,56	2,644	2,634	0,045	0,027
11,11	2,644	2,634	0,043	0,028
22,22	2,644	2,634	0,038	0,029
44,44	2,649	2,640	0,040	0,030
66,67	2,649	2,640	0,041	0,033
88,89	2,649	2,649	0,044	0,034
111,11	2,644	2,649	0,045	0,039
133,33	2,640	2,640	0,048	0,041

необходимое для того или иного растения, и таким образом разработать оптимизированный фитооблучатель под каждый тип растений, что может быть экономически целесообразным.

На основе полученных результатов были смоделированы спектры фитооблучателей. Моделирование производилось таким образом, чтобы спектр излучения облучателя был максимально приближен к спектру поглощения того или иного пигмента растения. Например, на рис. 8 представлен спектр поглощения пигмента хлорофилла *b*, а также спектр смоделированного фитооблучателя (рабочие токи красных, зелёных и синих СД равны, соответственно, 60 и 80 мА). Как видно на рисунке, спектр излучения смоделированного фитооблучателя хорошо согласуется со спектром поглощения пигмента хлорофилла *b*, а значит, такой излучатель может обеспечить сравнительно большую энергоэффективность.

Нагревом можно объяснить и заметное на рис. 2–4 увеличение полуширины пика, которое в переводе на длины волны составило в среднем примерно от 10 до 25 нм.

Такой сдвиг особенно чётко проявляется у красных СД, кристаллы которых изготовлены на основе сложных четверных растворов алюминия, галлия, индия и фосфора, а также у зелёных СД, в активной области кристаллов которых имеет место высокая концентрация индия. В активной области кристаллов синих СД концентрация индия ниже, и сдвиг выражен не так ярко.

4. Параметр аппроксимации E_0 для красных, зелёных и синих СД варьируется в пределах 15–20 эВ, 45–60 эВ и 50–62 эВ соответственно. Видно, что для красных СД значения данного параметра меньше, чем kT , но отличие не очень существенное, а для зелёных и синих СД значение параметра E_0 заметно больше, чем kT . Это различие особенно сильно проявляется в нитридах из-за больших флуктуаций потенциала.

5. На основе полученных результатов можно сформулировать рекомендации для разработки и производства источников света и светотехнических изделий на основе красных, зелёных и синих СД. Поскольку с увеличением тока в спектрах красных и зелёных СД наблюдается сдвиг положения максимума, то указанный сдвиг нужно учитывать при выборе рабочего режима светотехнического устройства путём подбора как диапазона рабочего тока, так и теплового режима. При этом правильный выбор рабочего тока и теплового режима важен ещё и потому, что увеличение плотности тока в активной области кристалла СД приводит к её перегреву, который может быть критичным для деградации параметров СД и источников света и фитооблучателей на их основе. Для подбора теплового режима следует использовать эффективные средства отвода тепла, вплоть до принудительного охлаждения СД устройства в тех случаях, когда это является критичным.

5. Моделирование фитооблучателя

На основе проведённых исследований характеристик СД было выполнено моделирование источника излучения с управляемым спектром, предназначенного для использования в фитооблучателях. В качестве управляющих параметров использовались ток для изменения положения спектральных максимумов в той или иной области активного поглощения пигментов и количество работающих единичных излучателей для корректировки соотношения потоков излучения или фотонов в различных диапазонах области ФАР [2,3].

Такой фитооблучатель смог бы обеспечить необходимый спектр излучения для различных вегетационных периодов. Другими словами, он смог бы обеспечить необходимый спектр в течение всего периода роста растения и при этом требовал бы минимальных затрат энергии. Меняя управляющие параметры, можно добиться сравнительно высокой производительности на любой из стадий роста растения. Ещё одним преимуществом такого фитооблучателя является то, что он охватывает сравнительно большой спектральный диапазон, включающий в себя всё – и красную, и зелёную, и синюю – области ФАР. После моделирования источника излучения с перестраиваемым спектром и проведения исследований с его помощью, можно определить оптимальное количество светодиодов,

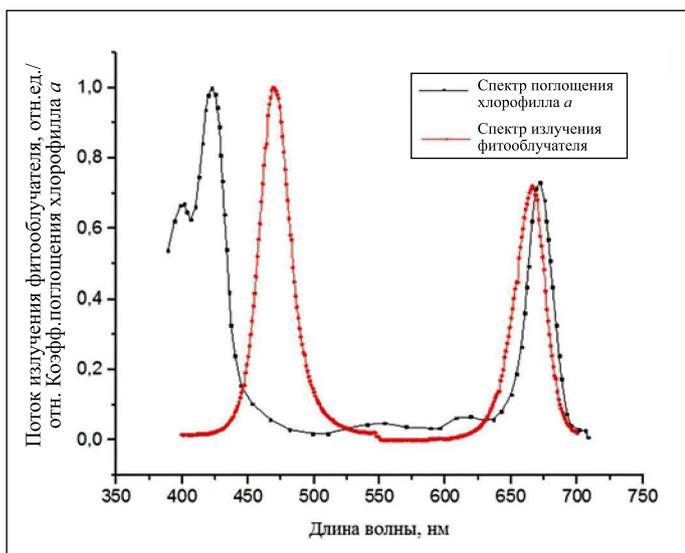


Рис. 9. Спектр поглощения хлорофилла *a* и смоделированный спектр излучения фитооблучателя

Следует отметить, что исследуемые СД не перекрывают часть приведённого на рис. 8 спектра поглощения хлорофилла *b* (область 600–620 нм). Для охвата этого участка спектра было бы целесообразно использовать СД янтарного цвета, которые в данной работе не исследовались.

На рис. 9 представлен спектр поглощения пигмента хлорофилла *a*, а также спектр соответствующего смоделированного фитооблучателя (рабочие токи красных, зелёных и синих СД равны, соответственно, 120 и 100 мА). Из рисунка видно, что с помощью исследованных СД можно сформировать спектр, который относительно хорошо согласуется со спектром поглощения пигмента только в длинноволновой области.

Для охвата коротковолновой области спектра поглощения пигмента хлорофилла *a* и других пигментов целесообразно использовать фиолетовые СД [13, 14]. На рис. 10 представлены спектры излучения таких СД при различных значениях тока [13, 14]. Как видно на рисунке, максимум излучения этих СД соответствует максимуму поглощения пигмента хлорофилла *a* в фиолетовой области спектра (рис. 9), а это говорит о том, что при использовании данных СД фитооблучатель сможет эффективно работать с пигментами и в коротковолновой области спектра.

6. Заключение

В результате проведённых исследований красных, синих и зелёных СД были получены зависимости их спектров и потоков излучения от тока. С помощью проведённых аппроксимаций были объяснены механизмы протекания тока и рекомбинации в исследованных СД, а также установлена корреляция между результатами спектральных измерений и измерений зависимости потока излучения от тока для красных, зелёных и синих СД. На основе полученных экспериментальных результатов была предложена модель фитооблучателя с управляемым спектром излучения, сформированная с учётом выявленных экспериментально спектральных особенностей, например, сдвига положения максимума спектра излучения при увеличении тока в сторону длинных волн у красных СД и в сторону

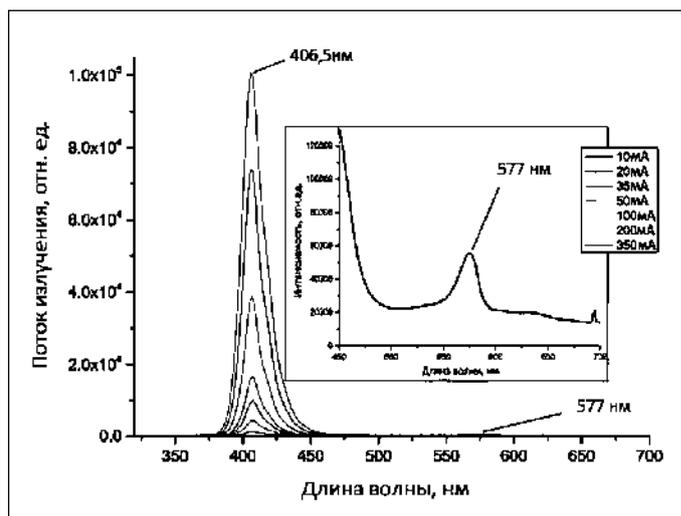


Рис. 10. Спектр излучения фиолетового СД при различных значениях тока [13]

коротких волн у зелёных СД, тогда как у синих СД сдвиг положения максимума не наблюдался. Проведённое моделирование показало, что эти фитооблучатели позволяют перестраивать спектр излучения в зависимости от потребностей – различные вегетационные периоды роста растений требуют различные спектры излучения, т.к. в разные периоды развития растения за его рост отвечают пигменты с разными спектрами поглощения.

Похожая модель многоцветного источника излучения с управляемым спектром была описана в [15], где авторы предложили многоцветный источник света на основе светодиодов с возможностью управления спектром путём измерения тока через светодиоды для использования в качестве универсального калибровочного источника. Различия состоит в том, что авторы [15] помимо цветных СД, излучающих в разных диапазонах видимого спектра, использовали ещё и СД белого света. Принимая во внимание полученные в [15] результаты, можно предположить, что использование СД белого света целесообразно и в фитооблучателях, и исследование характеристик таких СД и моделирования фитооблучателей с их использованием может являться темой продолжения описанных выше исследований.

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

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Справочная книга по светотехнике / Под ред. Ю.Б. Айзенберга. 3-е изд., перераб. и доп. – М.: Знак, 2006. – 972 с.
2. Прикупец Л.Б. Технологическое освещение в агропромышленном комплексе России // Светотехника. – 2017. – № 6. – С. 6–14.
3. 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-зелёных культур // Светотехника. – 2018. – № 5. – С. 6–12.

4. Протасова Н.Н. Светокультура как способ выявления потенциальной продуктивности растений // Физиология растений.– 1987. – Том 34, № 4. – С. 812–822.

5. Бахарев И.А., Прокофьев А.Ю., Туркин А.Н., Яковлев А.А. Применение светодиодных светильников для освещения теплиц: реальность и перспективы // СТА.– 2010.– № 2. – С. 76–82.

6. Прокофьев А.Ю., Туркин А.Н., Яковлев А.А. Перспективы применения светодиодов в растениеводстве // Полупроводниковая светотехника.– 2010.– № 5. – С. 60–63.

7. Блейки Р. Светодиодное освещение – будущее растениеводства // Полупроводниковая светотехника.– 2018.– № 2. – С. 54–58.

8. Шуберт Ф. Светодиоды. Пер. с англ. под. ред. А.Э. Юновича, 2-е изд. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2008.– 496 с.

9. Золина К.Г., Кудряшов В.Е., Туркин А.Н., Юнович А.Э. Спектры люминесценции голубых и зелёных светодиодов на основе многослойных гетероструктур InGaN/AlGaIn/GaN с квантовыми ямами // ФТП.– 1997. – Том 31, № 9. – С. 1055–1061.

10. Kudryashov, V.E., Turkin, A.N., Yunovich, A.E., Zolina, K.G., Nakamura, S. Spectra of superbright blue and green InGaN/AlGaIn/GaN light-emitting diodes // Journal of the European Ceramic Society. – Vol. 17, Issues 15–16. – P. 2033–2037.

11. Yunovich, A.E., Kovalev, A.N., Kudryashov, V.E., Turkin, A.N., Zolina, K.G., Kovalev, A.N., Manyachin, F.I. Mechanism of electroluminescence in InGaN/AlGaIn/GaN heterojunctions with quantum wells // Proc. of the 2nd Symp. on III–V Nitride Materials and Processes. Electrochem. Soc., Pennington, NJ.– 1998. – Vol. 98–02. – P. 83–102.

12. Кудряшов В.Е., Туркин А.Н., Юнович А.Э., Ковалёв А.Н., Маняхин Ф.И. Люминесцентные и электрические свойства светодиодов InGaN/AlGaIn/GaN с множественными квантовыми ямами // ФТП.– 1999. – Том 33, № 4. – С. 445–450.

13. Авакянц Л.П., Асланян А.Э., Боков П.Ю., Волков В.В., Матешев И.С., Туркин А.Н., Червяков А.В., Юнович А.Э. Люминесцентные и электрические свойства ультрафиолетовых и фиолетовых светодиодов из гетероструктур на основе нитрида галлия // Учёные записки физического факультета МГУ им. М.В. Ломоносова.– 2016.– № 3, 163401–1 – 163401–7.

14. Волков В.В., Коган Л.М., Туркин А.Н., Юнович А.Э. Спектры люминесценции мощных светодиодов на основе нитрида галлия в ультрафиолетовой и фиолетовой областях спектра // ФТП.– 2018. – Том 52, № 10. – С. 1172–1176.

15. Карли Н., Сперлинг А., Бизяк Г. Реализация лабораторного образца настраиваемого многоцветного источника света // Светотехника.– 2019.– № 5. – С. 13–19.



Ерохин Михаил Михайлович. Окончил в МГУ им. М.В. Ломоносова (2019 г.). Инженер испытательного центра ВНИСИ им. С.И. Вавилова



Камшилов Павел Валентинович. Окончил в 1998 году Московский государственный университет геодезии и картографии (1998 г.) по специальности «Опτικο-электронные приборы и системы». Главный специалист ВНИСИ им. С.И. Вавилова, ассистент кафедры светотехники НИУ «МЭИ»



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



Туркин Андрей Николаевич, кандидат физико-математических наук. Окончил МГУ им. М.В. Ломоносова (1995 г.). Доцент кафедры оптики, спектроскопии и физики наносистем физического факультета ФГБОУ ВПО «МГУ им. М.В. Ломоносова». Доцент кафедры светотехники НИУ «МЭИ»

Учёные научились «хранить» механические и световые волны

Волны света и звука лежат в основе большинства наших технологий – от двигателей до смартфонов. Учёные, однако, ещё не нашли способа сохранить волну в целостности на неопределённое время, а затем направить её в нужную точку, пишет *Science Daily*.



Эксперимент учёных из Городского университета Нью-Йорка и Технологического института Джорджии доказал, что нетрадиционные формы возбуждения открывают новые возможности контроля за распространением и рассеянием волн. Аккуратно настроив временную зависимость от возбуждения, можно поймать волну в полости, а затем выпустить её в нужном направлении. Для этого исследователям нужно было понять, как изменить базовые взаимодействия между волнами и материалами. Когда волна света или звука сталкивается с препятствием, она либо частично поглощается, или отражается и рассеивается. Процесс поглощения вызывает немедленное превраще-

ние волны в тепло или другие формы энергии. Вещества, не поглощающие волны, могут только отражать их.

Целью учёных был поиск метода имитации процесса поглощения без превращения волны в другие формы энергии, но сохранение её в материале. Эта идея, предложенная теоретиками два года назад, получила название *когерентной виртуальной поглощения*. Чтобы доказать эту теорию, пришлось подогнать временную эволюцию волн таким образом, чтобы, вступая в контакт с неабсорбирующими материалами, они не отражались и не поглощались. Волна должна быть поймана внутри, как если бы она была поглощена – и её можно будет освободить по необходимости.

Этот универсальный метод, экспериментально уже опробованный на механических волнах, можно с тем же успехом использовать для радиоволн или света, утверждают авторы опубликованной в журнале «*Science Advances*» статьи. Так что соответствующие устройства в будущем могли бы преобразить то, как мы собираем энергию, храним информацию и разное-разное другое.

nanonewsnet.ru
03.09.2019

Выбор площади оконных проёмов жилых зданий в условиях муссонного климата Дальнего Востока РФ и северных районов КНР

А. К. СОЛОВЬЁВ, ЖУЙПУ Б.

Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ), Москва
E-mail: agpz@mgsu.ru, biguofu16@gmail.com

Аннотация

В архитектуре принято понимать под словом «окно» отверстие в стене или кровле для проникновения естественного света, солнечных лучей и свежего воздуха в помещения. В последнее время к этому присоединяется требование обеспечения контакта с внешней средой. Особенно это важно в жилье, где комнаты считаются жилыми, если они имеют окна. От размеров, формы и расположения окон зависит потребление энергии зданием. Зимой через окна происходят большие потери тепла, а летом, наоборот, через окна поступает много тепла, которое надо удалять с помощью кондиционирования воздуха. Кроме того, через окна в помещение поступает естественный свет, который экономит большое количество электроэнергии на искусственное освещение. Настоящая статья посвящена частично-му решению проблемы энергоэффективности жилых зданий путём определения наиболее эффективной площади окон с точки зрения расходования энергии на восполнение теплопотерь через окна зимой, ликвидацию теплопоступлений через них летом и расхода энергии на искусственное освещение помещений в течение года. Приводится анализ результатов расчёта энергопотребления для жилого помещения в условиях муссонного климата российского Дальнего Востока и северных районов КНР.

Ключевые слова: площадь окон, энергоэффективность, естественное и искусственное освещение, теплопотери, теплопоступления, критическая освещённость, энергозатраты.

Введение

Площадь окон в жилых зданиях устанавливается с помощью нормируемых значений коэффициента естественного освещения (КЕО). Однако КЕО характеризует только физические условия естественного освещения в помещении. У нас считается, что при КЕО в 0,5 % в глубине помещения на расстоянии 1 м от стены, противоположной окнам, на полу создаётся впечатление о насыщенности естественным светом этого помещения, а в других странах нормы могут быть другими. Так, в ФРГ считается, что насыщенность естественным светом в помещении достигается при КЕО = 0,5 % в середине глубины помещения на уровне рабочей поверхности (т.е. в 0,8 м от пола) на расстоянии 1 м от боковой стены помещения [1]. В данной статье использовались российские нормы [2].

Окна – самое слабое место в теплоизоляционном контуре здания. Зимой через них уходит наибольшее количество тепла. Так, нормы [3] в Москве требуют обеспечения сопротивления теплопередаче около $3 \text{ м}^2 \cdot \text{°C} / \text{Вт}$, а обычные окна не обеспечивают и $1 \text{ м}^2 \cdot \text{°C} / \text{Вт}$. Это значит, что через окно уходит втрое больше тепла зимой, чем

через глухую часть стены, что обуславливает дополнительные энергозатраты на отопление. Летом же, наоборот, через окна поступает много солнечного тепла, вызывающего перегрев помещения и повышенные затраты электроэнергии на охлаждение при кондиционировании воздуха.

В НИИСФ РААСН разработана методика энергетической оценки систем естественного освещения зданий с учётом затрат энергии на электрическое освещение, восполнение теплопотерь через окна зимой и затрат энергии на охлаждение помещения с помощью кондиционеров летом [4]. Авторы статьи немного модернизировали эту методику с учётом новых типов кондиционеров (сплит-системы) путём упрощения расчёта времени работы кондиционеров и учли новые положения по оценке энергоэффективности естественного освещения согласно СП [5].

Климатические условия муссонного климата российского Дальнего Востока и северо-восточных районов КНР

Города Хабаровск (РФ) и Харбин (КНР) являются характерными и сходными по климату для Дальнего Востока РФ и для северо-восточной части КНР. Их климат характеризуется большим количеством ясных и полужасных дней и высокой солнечной радиацией как летом, так и зимой. Так, в Хабаровске в 12 ч дня в январе диффузная и суммарная освещённости составляют 13,8 и 28,6 клк, а в июле – 29,3 и 56,5 клк, а в Москве – 7,0 и 9,2 клк в январе и 28,3 и 47,8 клк в июле. Соотношения этих величин в 12 ч дня в Хабаровске: 1:2,07 в январе и 1:1,92 в июле, а в Москве: 1:1,31 в январе и 1:1,69 в июле. Это означает, что в Хабаровске солнечных и полужасных дней вдвое больше, чем пасмурных, а в Москве ясных и полужасных дней значительно меньше, особенно в зимние месяцы. В Харбине количество ясных и полужасных (с открытым солнцем) дней примерно то же, что и в Хабаровске. И температурный режим в обоих городах примерно одинаков (табл. 1). А из табл. 2 видно, что и для летнего периода, в котором достаточно редко, но приходится прибегать к искусственному охлаждению воздуха за счёт кондиционирования, оба города можно рассматривать как идентичные.

Известны данные о повторяемости температур в городах РФ [6], в том числе по Хабаровскому краю, где повторяемость температур выше 28 °C составляет всего 16 ч в год (т.е. кондиционирование (охлаждение) помещений, ориентированных на север, необходимо в течение 16 ч в год). Это пренебрежимо мало, и можно рассчитывать затраты энергии на охлаждение помещений, выходящих на юг, запад и восток, только по условиям перегрева от солнечной радиации.

Средние температуры по месяцам, принятые температуры и некоторые данные для зимнего периода

Город	Средняя температура наружного воздуха, °С												Годовые показатели					
	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII	Средняя годовая температура, °С	Абсол. температурн. минимум, °С	Абсол. температурн. максимум, °С	t_1^* , °С	$t_{от}^{**}$, °С	$Z_{от}$, сут
Хабаровск	-22,3	-17,2	-8,5	3,1	11,1	17,4	21,1	20,0	13,9	4,7	-8,1	-18,5	1,4	-43	40	-34	-10,1	205
Харбин	-23,1	-18,7	-8,8	8,4	8,4	15	18,3	16,7	8,9	0,6	-9,6	-19,1	4,9	-38,1	36,8	-33	-10	176

* Принятая минимальная температура наружного воздуха в холодный период.

** Средняя температура наружного воздуха в отопительный период.

Таблица 2

Климатические данные для летнего периода в Хабаровске и Харбине

Город	Температура, °С						Преобладающее направление ветра в июле–августе	Максимальная из средних скоростей ветра по румбам в июле, м/с	
	V	VI	VII	VIII	IX	Абсолютная максимальная температура воздуха			Средняя максимальная температура воздуха
Хабаровск	11,1	17,4	21,1	20,0	13,9	40,0	25,7	ЮЗ	4,6
Харбин	8,4	15	18,3	16,7	8,9	36,8	26,4		1,71

Методика расчёта энергозатрат на естественное освещение

Оценка систем естественного освещения может производиться двумя способами: 1) оценка по приведённым затратам на устройство естественного и искусственного освещения и его эксплуатацию (в руб. на м² площади помещения в год); 2) оценка по энергозатратам на освещение, восполнение теплопотерь через светопроемы и ликвидацию теплопотуплений через них (в кг условного топлива на 1 м² площади помещения в год). Первый способ хорошо подходит для экономической оценки конкретного проекта при стоимостных расчётах с учётом соответствующих текущих цен и расценок, но для общей оценки он малопригоден, т.к. учёт изменения цен на перспективу практически невозможно. Для этой цели больше подходит второй способ, дающий оценку системы в энергозатратах, более объективную и долгосрочную.

Годовой удельный расход тепловой энергии на отопление $W_{T,OT}$ (ГДж/м²/год) определяется как

$$W_{T,OT} = 10^{-6} \cdot 1,1 \cdot 3,6 \cdot 1,3 \cdot \left(\frac{1}{R_{ск}} - \frac{1}{R_0} \right) \times \\ \times (t_b - t_{от}) \cdot 8760 \cdot Z_{от} \cdot b \cdot \frac{A_{ск}}{365 \cdot A_n},$$

где 10^{-6} – коэффициент перевода из Дж в ГДж; 1,1 – коэффициент, учитывающий бесполезные потери тепла в системах отопления; 3,6 – коэффициент пересчёта единиц,

кДж/Вт·ч; 1,3 – коэффициент, учитывающий потери тепла на нагревание наружного воздуха за счёт проветривания помещения; $R_{ск}$ и R_0 – сопротивления теплопередаче окна и стены, м²·°С/Вт; 8760 – количество часов в году; $t_{от}$ и $Z_{от}$ – средняя температура, °С, и длина отопительного периода, сут; t_b – температура внутреннего воздуха здания; b – отношение площади остекления к площади проёма в стене; $A_{ск}$ и A_n – площади окон и пола, м²; 365 – количество дней в году [4].

В жилой комнате удельные затраты энергии на восполнение теплопотерь через окно при $R_{ск}$ 0,7 м²·°С/Вт и R_0 2,12 м²·°С/Вт составят 0,026 ГДж/м²/год, В пересчёте на 1 кг условного топлива это составит 1,07 кг/м²/год (41,2 кг/ГДж·0,026 ГДж/м²/год).

Годовой удельный (на 1 м² площади) расход электроэнергии на искусственное освещение помещения $W_{э.и.}$ (кВт·ч/м²/год) рассчитывается согласно [4]:

$$W_{э.и.} = 10^{-3} \cdot E_{н}^{норм} \cdot Z \cdot \alpha \cdot P_{л} \times \\ \times (1 + \beta) \cdot T_{и} / [(u_{св} \cdot MF) \cdot \Phi_{л}], \quad (1)$$

где $E_{н}^{норм}$ – нормированная искусственная освещённость в жилых комнатах, лк, равная 150 лк; MF – коэффициент эксплуатации для светильников искусственного освещения [2], принятый равным 0,71; Z – коэффициент, учитывающий неравномерность освещённости (для жилых помещений достаточно высокий и ориентировочно равный 1,3 [2]); α – коэффициент, учитывающий потери энергии в пускорегулирующей аппаратуре, который для ЛЛ и СД

ламп можно принять равным 1,2; β – коэффициент, учитывающий потери энергии в сети (при использовании ЛН, ЛЛ или СД ламп он равен 0,03); $P_{л}$ и $\Phi_{л}$ – общие мощность и световой поток ламп, Вт; $u_{св}$ – коэффициент использования светильника, при индексе помещения $i = 0,8$ равный 44 [7]; $T_{и}$ – время использования искусственного освещения, определяемое по критической освещённости $E_{кр}$ и графикам хода естественной освещённости в Хабаровске (рис. 1).

При вышеуказанных параметрах помещения и светопрёма на расстоянии 1 м от задней стены на полу расчётное значение КЕО e составляет 0,84 %, в связи с чем

$$E_{кр} = \frac{E_{и}^{норм} \cdot 100}{e} = 17,65 \text{ (клк)}.$$

Из рис. 1 видно, что в расчётной точке помещения нормированные 150 лк как минимум соблюдаются 105 ч (3,5·30) в сентябре, 186 ч (6,0·31) в марте, 217,6 ч в апреле, 232,5 ч в мае, 240,0 ч в июне, 258,23 ч в июле и 217,0 ч в августе. Годовое время использования естественного света составляет 1238,73 ч. $T_{и}$ есть разность общего числа часов в год за вычетом по 8 ч сна в сутки и времени использования естественного света: 4578,9 ч [(16·30,3·12 = 5817,6) – 1238,7]. $W_{э,и}$, по формуле (1), равен 8,586 кВт·ч/м²/год, В пересчёте на расход условного топлива $W_{э,и}^{усл}$ это эквивалентно 2,833 кг/м²/год (0,33·8,586). При этом мы принимаем, что расход условного топлива на электростанциях общего использования на 1 ГДж тепловой энергии A_1 равен 41,2 кг, а на 1 кВт·ч электроэнергии A_2 – 0,33 кг [4].

Таким образом, расход условного топлива на восполнение теплопотерь через окна и на искусственное освещение исследуемой комнаты $W_{усл}$, рассчитываемый как

$$W_{усл} = W_{т.от} \cdot A_1 + W_{э,и} \cdot A_2,$$

составляет 2,54 + 2,83 = 5,37 кг/м²/год.

Расход условного топлива на восполнение теплопотерь через окно в зимнее время прямо пропорционален площади окна, т.е. значение 2,54 кг/м²/год для ряда окон других размеров можно менять пропорционально площади. Аналогичного пересчёта затрат условного топлива в части искусственного освещения производить нельзя, так как они зависят от $T_{и}$.

$T_{и}$ зависит от $E_{кр}$ и определяется по рис. 1. Для определения $E_{кр}$ надо рассчитывать e в расчётной точке помещения при вышеуказанных размерах помещения и других рассматриваемых размерах окна.

Исследование энергетической эффективности окон разных размеров в муссонном климате юга Дальнего Востока РФ и северо-восточной части КНР

Для проведения данного исследования было выбрано жилое помещение размером 4×6 м с высотой от пола до потолка 3 м на одном из средних этажей многоэтажного здания при отсутствии противостоящего здания. Тип остекления описан выше.

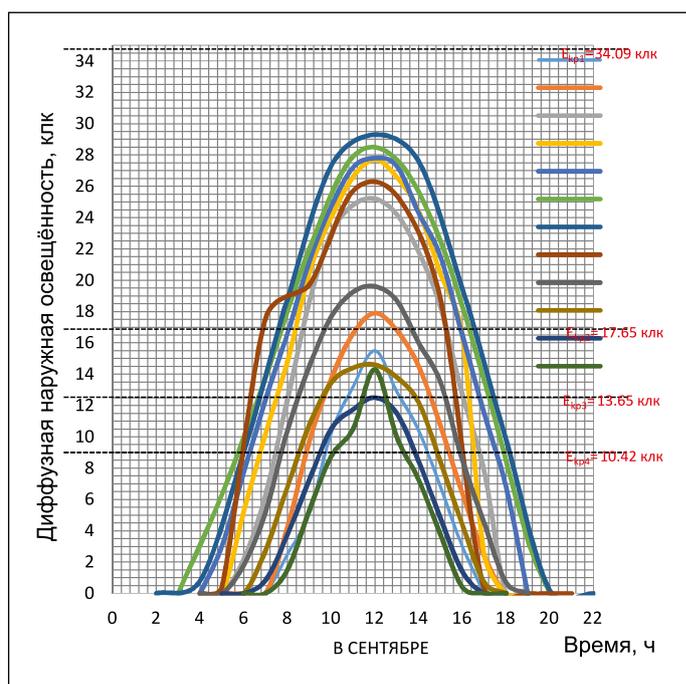


Рис. 1. Графики хода наружной диффузной освещённости в Хабаровске

Исследованы 4 типа окон: стандартное, высотой 1,5 м и шириной 2,1 м; большое, высотой 1,7 м и шириной 2,5 м; окно уменьшенных размеров, 1,5 × 1,8 м; окно высотой 1,7 м и шириной практически на всю ширину комнаты – 3,5 м.

Результаты соответствующего расчёта приведены в табл. 3 и на рис. 2, из которого видно, что наименьшие затраты энергии, в кг условного топлива, на восполнение теплопотерь через окна и для искусственного освещения исследуемого помещения, имеют место при площади окон от 3 до 5,0–5,5 м². При меньших окнах расходы электроэнергии на электрическое освещение резко возрастают. При окнах площадью свыше 5,5 м² расход энергии на восполнение теплопотерь через окна будет превалировать, повышая общие затраты энергии.

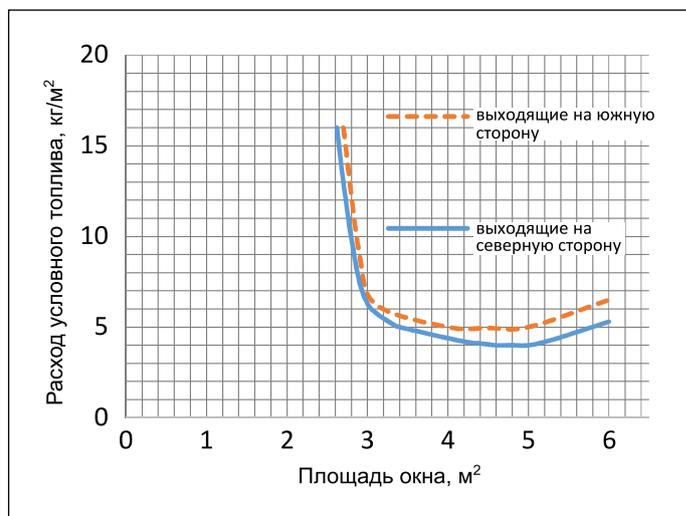


Рис. 2. Расход условного топлива на эксплуатацию окна (на восполнение теплопотерь через окно зимой, на искусственное освещение и на охлаждение летом)

Расходы условного топлива на эксплуатацию окон в год

№	Тип окна (размеры), м	Площадь окна, м ²	$W_{\text{т.от}}, \text{ кг/м}^2$	$W_{\text{э.л.}}, \text{ кг/м}^2$	$W_{\text{усл}} = W_{\text{т.от}} + W_{\text{э.л.}}, \text{ кг/м}^2$
1	1,5 × 1,8	2,7	2,18	13,29	15,47
2	1,5 × 2,1	3,15	2,54	2,835	5,37
3	1,7 × 2,5	4,25	3,43	1,626	5,056
4	1,7 × 3,5	5,95	4,8	1,22	6,02

Таблица 4

Расходы условного топлива на эксплуатацию окон при южной (ЮЗ) и, для сравнения, северной ориентации помещений

№	Тип окна (размеры), м	Площадь окна, м ²	$W_{\text{усл}}, \text{ кг/м}^2$, на северной стороне	$W_{\text{усл}}, \text{ кг/м}^2$, на южной стороне	$W_{\text{э.х}}, \text{ кг/м}^2$
1	1,5 × 1,8	2,7	15,47	16,042	0,0572
2	1,5 × 2,1	3,15	5,37	6,038	0,668
3	1,7 × 2,5	4,25	5,056	5,957	0,901
4	1,7 × 3,5	5,95	6,02	7,281	1,261

Следует отметить, что этот вывод справедлив только для помещений, ориентированных на север, север–северо-запад и север–северо-восток. Для южных ориентаций следует учитывать нагревание помещений за счёт солнечной энергии, поступающей через окна. В этом случае в помещении может требоваться охлаждение с помощью кондиционеров, потребляющих много энергии.

Удельное потребление электроэнергии на охлаждение $W_{\text{э.х}}$ следует определять, согласно [4], по формуле

$$W_{\text{э.х}} = L_0 \cdot N_x \cdot T_x, \quad (2)$$

где N_x – расход электроэнергии на охлаждение воздуха с помощью кондиционера (кВт·ч/м³); T_x – длительность работы системы охлаждения, ч; L_0 – производительность системы вентиляции кондиционера (м³/ч) на 1 м² площади пола с учётом средней теплоинерционности помещения, рассчитываемая как

$$L_0 = \frac{3,6 \cdot 0,7 \cdot q_{\text{рад}}^{\text{макс}}}{c \cdot \rho \cdot (t_{\text{пр.А}} - t_{\text{р.А}})}, \quad (3)$$

где 3,6 – коэффициент пересчёта единиц, кДж / Вт ч; 0,7 – учёт нагрева воздуха в трубопроводах; $c = 1$ кДж/кг/°С – удельная теплоёмкость воздуха; $\rho = 1,2$ кг/м³ – плотность воздуха; $t_{\text{пр.А}} - t_{\text{р.А}}$ – разность летней расчётной приточной температуры воздуха и температуры воздуха в квартире, принимаемая равной 3 или 5 °С в зависимости от теплонапряжённости помещения [8]; $q_{\text{рад}}^{\text{макс}}$ – наибольшее значение

радиационного теплопоступления в помещение, Вт/м², определяемое максимальным значением теплопоступлений от суммарной солнечной радиации, падающей на плоскость окна в течение суток, и рассчитываемое по формуле

$$q_{\text{рад}}^{\text{макс}} = (Q_{\text{в.пр.в}}^{\text{макс}} + Q_{\text{в.рас}}^{\text{макс}}) \cdot \tau_e \cdot \tau_2 \cdot MF \cdot \beta_{\text{с.з}} \cdot b \cdot A_{\text{ск}} / A_1, \quad (4)$$

где $Q_{\text{в.пр.в}}^{\text{макс}}$ и $Q_{\text{в.рас}}^{\text{макс}}$ – наибольшие значения прямого и рассеянного теплопоступлений от солнечной радиации на вертикальную поверхность окна соответствующей ориентации (Вт/м²) при безоблачном небе, определяемые по СНиП [6] (для Хабаровска (48° с.ш.) при ориентации на ЮЗ $Q_{\text{в.пр.в}}^{\text{макс}} + Q_{\text{в.рас}}^{\text{макс}} = 473$ Вт/м²); τ_e – коэффициент пропускания светопрозрачного заполнения проёма для солнечной радиации, равный 0,57 [5]; τ_2 – коэффициент, учитывающий потери света в переплётках окна [2], принятый равным 0,9; MF – здесь коэффициент, учитывающий загрязнение стекла при эксплуатации [2], принятый равным 0,71; $\beta_{\text{с.з}} = \tau_4 = 1$ (солнцезащитные устройства отсутствуют); $b = 1$.

В формуле (2):

– T_x определяется по СНиП [6, табл. «Повторяемость температур наружного воздуха в часах»] для наружной температуры $t_n = 25$ °С, взятой с некоторым запасом, учитывающим тепловую инерцию внутренних конструкций помещения. Для Хабаровска $T_x = 66$ ч;

– для определения N_x (согласно [9]) необходимо рассчитать теплоизбытки помещения (Q), в которые входят тепло от солнечной радиации, поступающей через окна (Q_1), тепло от бытовой техники (Q_2) и тепло, выделенное людьми (Q_3). При этом $Q_1 = V \cdot q$, где V – объём помещения (в нашем примере 72 м³, 4 × 6 × 3 м³); q – удельное количество тепла, поступающего в помещение через окна юго-западной ориентации, принимаемое равным 30 Вт/м³; $Q_1 = 2160$ Вт; $Q_2 = 500$ Вт (телевизор, компьютер); $Q_3 = (100 \text{ Вт / чел}) \cdot 3 \text{ чел} = 300$ Вт; $Q = 2960$ Вт.

Согласно этому подбираем современный бытовой кондиционер «Samsung» с холодопроизводительностью 3,2 кВт. Его производительность по воздуху $P = 900$ м³/ч. Тог-

да расход электроэнергии на охлаждение воздуха с помощью этого кондиционера $N_x = Q/P = 3,23 \text{ Вт} \cdot \text{ч}/\text{м}^3$.

Далее, множитель L_0 в формуле (2), для расчёта $W_{3,x}$, рассчитывается по формулам (3) и (4) и справочным данным [6], а для перевода $W_{3,x}$ в килограммы условного топлива на 1 м^2 эту величину надо умножить на переводной коэффициент $A_2 = 0,33 \text{ кг}/\text{кВт} \cdot \text{ч}$.

Для исследуемых окон в комнате площадью $4 \times 6 \text{ м}^2$, ориентированной на юго-западную сторону (ЮЗ) горизонта, при использовании для летнего охлаждения бытового кондиционера расходы условного топлива на восполнение теплопотерь через окна зимой, на искусственное освещение и на охлаждение летом приведены в табл. 4.

На рис. 2 представлены графики изменения затрат условного топлива на эксплуатацию светопроемов разной площади, в жилом помещении, ориентированном на северную и южную стороны горизонта при условии, что в комнате, ориентированной на южную сторону горизонта, при $t_n > +25 \text{ }^\circ\text{C}$ включается бытовой кондиционер «Samsung». Поступление тепла через окно в зимнее время при этом не учитывается.

Ещё раз отметим, что наименьшие расходы условного топлива имеют место при площади окна от 3 до $5,0\text{--}5,5 \text{ м}^2$ как при ориентации окна на южную, так и на северную стороны горизонта (рис. 2).

Также отметим, что значения величин Q_1 , Q_2 и Q_3 принимались согласно [9], и хотя при их изменении удельный расход электроэнергии на охлаждение может меняться, это не влияет на результаты данного исследования.

Выводы

Исследования для климатических условий Хабаровска показали, что площади окна от 3 до $5,0\text{--}5,5 \text{ м}^2$ в комнатах глубиной до 6 м, максимальной для жилья, – наиболее энергоэффективны. В Харбине, где климатические параметры аналогичны, наиболее энергоэффективны окна такой же площади. Конечно, в каждом конкретном случае следует учитывать затенение окружающей застройкой, но для типовой застройки такие рекомендации можно считать общими.

В КНР возобновляемая энергия стала дешевле энергии от сжигания газа

Компания *Wood Mackenzie* опубликовала отчёт о состоянии возобновляемой электроэнергетики в КНР, отметив в нём рубежный момент: впервые энергия ВИЭ в среднем по стране стала дешевле получаемой за счёт сжигания газа. К 2026 г. чистая энергия станет доступнее и самого дешёвого и грязного варианта – от угольных ТЭС.

В Шанхае и Цинхэе цены на ВИЭ и уголь уравнились, а по всей стране это произойдёт к 2026 г. В самых отстающих районах за ВИЭ приходится сейчас платить на 70 % больше.

Ещё один важный тренд – заметное падение стоимости энергии солнца; в этом году в КНР она впервые стала ниже, чем от ветровых турбин. В начале августа была пройдена и ещё одна отметка – солнечная энергия стала дешевле, чем средняя цена по электросети. То есть проекты в этой сфере стали рентабельными без всяких оговорок.

При этом 25 лет назад в стране вообще не было солнечных станций, а теперь КНР – лидер по мощностям с минимум двукратным отрывом от преследователей.

www.nanonewsnet.ru/
26.08.019

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. DIN5034–3–1994 «Свет дневной в помещениях. Расчёт».
2. СП 52.13330.2016 «Естественное и искусственное освещение. Актуализированная редакция СНиП 23–05–95*».
3. СП 23–101–2000 «Проектирование тепловой защиты зданий».
4. НИИСФ Госстроя СССР. Пособие по расчёту и проектированию естественного, искусственного и совмещённого освещения (к СНиП II–4–79) / НИИСФ Москва, Стройиздат 1985.
5. СП 367.1325800.2017 «Здания жилые и общественные. Правила проектирования естественного и совмещённого освещения».
6. СНиП II–А.6–72 «Строительная климатология и геофизика».
7. Справочная книга для проектирования электрического освещения / Под ред. Г.М. Кнорринга. – Л.: Энергия, 1976. – 384 с.
8. Справочник проектировщика. Внутренние санитарно-технические устройства в 2 частях / Под ред. И.Г. Старовойтова. Часть 2. Вентиляция и кондиционирование воздуха. – М.: Стройиздат, 1978.
9. Справочные данные сплит-систем (по материалам фирмы SAMSUNG).



Соловьёв Алексей Кириллович, доктор техн. наук, профессор. Окончил в 1965 г. МИСИ им. В.В. Куйбышева. Профессор кафедры «Проектирование зданий и со-оружений» (б. кафедра «Архитектура гражданских и промышленных зданий») НИУ «МГСУ». Член Европейской академии наук и искусств и редколлегии журналов «Свето-техника» и «Light & Engineering». Имеет звания «Почётный строитель РФ» и «Заслуженный работник высшей школы РФ»



Жуйун Би, бакалавр и магистр (специальность «Промышленное и гражданское строительство»). Окончил бакалавриат Хэйлунцзянского университета (2013 г.) и магистратуру НИУ МГСУ (2016 г.). Аспирант 3-го года обучения НИУ МГСУ

Случайно создали самый чёрный материал в мире

Исследователи из Массачусетского технологического университета создали самый чёрный в мире материал – он улавливает более 99,995 % входящего света. Открытие произошло случайно.

Учёные экспериментировали с методами выращивания нанотрубок на электропроводящих материалах, таких как алюминий – цель была в том, чтобы повысить их электрические и тепловые свойства. Команду удивил цвет полученного материала и они поняли, что изо-брили, когда измерили его оптическое отражение.

Разработку нанесли на природный жёлтый алмаз весом 16,78 карат и показали на художественной выставке на Нью-Йоркской фондовой бирже. Камень за \$2 млн выглядел как плоская и чёрная пустота вместо того, чтобы сверкать и переливаться.

По словам учёных, практическое применение самый чёрный в мире материал может найти широкое применение. Например, его можно использовать в оптических шторах, которые уменьшают нежелательные блики.

knife.media/
14.09.2019

Оптимизация освещённости объектов муниципальных образований и защита розничных потребителей электроэнергии: взаимообусловленность процессов

Г.Ф. РУЧКИНА^{1,2}, С.Г. ПАВЛИКОВ¹, Е.Ю. МАТВЕЕВА^{1,3}

¹ Финансовый университет при Правительстве Российской Федерации (Финуниверситет), Москва.

² E-mail: GRuchkina@fa.ru.

³ E-mail: eyumatveeva@fa.ru

Аннотация

Охарактеризованы основные направления оптимизации правового регулирования рынка электроэнергии, включая такой его специфический сегмент, как освещение городов, в контексте выявления ресурсов повышения качества электроэнергии, её экономного использования, защиты потребителей (абонентов). Выявлена взаимосвязь процессов обеспечения прав и законных интересов потребителей электроэнергии и одного из наиболее «энергоёмких» факторов – освещения объектов муниципальных образований. Установлено, что гарантии для потребителей электроэнергии, содержащиеся в ст. 38 Федерального закона РФ от 26.03.2003 № 35-ФЗ «Об электроэнергетике» (запрет ограничения режима потребления, включая так называемые веерные отключения и т.п.), детализируются подзаконными нормативными правовыми актами, некоторые из которых нуждаются в конкретизации в части более чёткого разграничения правовых категорий соотношения понятий «оптовый» и «розничный» рынок электроэнергии.

Подвергнуты научному анализу судебные позиции Верховного Суда 2019 г., которые обеспечивают более высокий уровень правовой защиты потребителя как наиболее слабой стороны правоотношений на изучаемом рынке; обосновывается суждение о том, что эти позиции в силу требований ст. 126 Конституции России должны стать ориентиром в части преодоления выявленных многочисленных противоречий в судебной практике по этому вопросу.

Сформированы конкретные предложения по дополнению (изменению) ряда федеральных законов и актов Правительства РФ.

Ключевые слова: Электроэнергия, освещение, рынок, потребитель, правовая позиция, договор, качество, методика, муниципальное образование.

1. Введение

По оценке Международного энергетического агентства, 19 % всей потребляемой в мире электроэнергии расходуется на освещение. По результатам социологических и иных исследований, проведённых учёными Департамента правового регулирования экономической деятельности (ДПРЭД) Финансового университета при Правительстве РФ в отношении процесса оптимизации правового регулирования деятельности, статуса и взаимоотношений участников рынка электроэнергии, можно констатировать незавершённость этого процесса. Кроме того, его реализация (соответствующие поручения даны Федеральному собранию и Правительству РФ) осложняется рядом негативных факторов, связанных с определённым спадом потребления на рынке электроэнергии и ростом цен на электроэнергию. К примеру, не в полной мере учитывается проблематика, связанная с попытками в той или иной степени возложить оплату освещения объектов, не являющихся общей собственностью многоквартирного дома, на физических лиц (потребителей услуг розничного рынка электроэнергии), имеют место многочисленные претензии со стороны абонентов (потребителей) в отношении качества предоставляемых услуг, включая освещённость муниципальных образований.

Практический аспект проблематики достаточно очевиден, поскольку

Россия занимает третье место в мире по производству электроэнергии, значительная часть которой расходуется на освещение улиц и иных объектов муниципальных образований [1]. В условиях появления новых геополитических вопросов, предопределяющих рост затрат на оборону страны и, как следствие, усиление социально-экономических проблем, необходим поиск правовых инструментов, обеспечивающих увеличение доли доходов от рынка электроэнергетики в ВВП РФ и, с другой стороны, анализ любых факторов, имеющих потенциал экономии электроэнергии, в том числе при освещении улиц. В конечном итоге, розничный потребитель должен получить социальные преференции, например, в части снижения тарифов на электроэнергию. Однако на практике имеют место, к сожалению, и противоположные процессы, требующие научного анализа.

В этом контексте связь теоретических и прикладных аспектов должно обеспечивать, к примеру, не только снятие терминологической неопределённости («рынок электроэнергии», «рынок электроэнергетики», «ресурсоснабжение»), появление новых исследовательских категорий (рынок энергетической мощности, обуславливающий предложения о внесении изменения в ст. 539 ГК РФ) и т.п. Наибольший исследовательский интерес представляет собой способ выявления ресурсов увеличения не только количества, но и качества электроэнергии, представленной на соответствующем рынке (Федеральный закон «Об электроэнергетике» оперирует терминами оптовый и розничный рынки электрической энергии) в интересах наиболее уязвимой и менее защищённой стороны изучаемых общественных отношений – потребителя электроэнергии.

Авторы статьи полагают, что должен иметь место критический анализ изменений законодательства об организации местного самоуправления в части фактического «размывания» вопросов местного значения применительно к обязанности обеспечения уличного освещения (в дальнейшем мы аргументируем данное суждение), должен быть обеспечен более высокий уровень экономии электроэнергии при освещении улиц.

2. Аналитический обзор (формулировка проблем научного исследования)

Основой исследования стали актуальные научные работы, в которых эффективность правового регулирования рынка электроэнергии в целом и качество предоставляемой электрической энергии, степень защищённости потребителей розничного рынка электроэнергии в частности – предлагается повысить на основе усиления конкуренции [2], совершенствования процедур (в частности, проведения аукционов, в том числе так называемых электронных, на строительство или ремонт) обслуживания объектов уличного освещения [3], совершенствования правовых норм, касающихся защиты прав абонентов-потребителей от ненадлежащего исполнения обязательств, связанных с предоставлением электрической энергии [4], установления определённых предпочтений для субъектов малого и среднего бизнеса, производителей сельскохозяйственной продукции [5] и т.п.

Особое внимание уделено работам практиков: судей, специализирующихся на рассмотрении дел, связанных с защитой прав потребителей анализируемого рынка [6, 7].

Исследование гражданско-правовых аспектов регулирования рынка энергетических услуг потребовало обращения к монографическим исследованиям ресурсоснабжения жилищно-коммунального хозяйства России [8], гражданско-правового регулирования оборота энергии [9], в том числе базирующимся на изучении соответствующего зарубежного опыта [10, с. 98–99].

Использованы ресурсы сайтов энергетических организаций и иные интернет – ресурсы. Так, экспертно-аналитический доклад экспертов рабочей группы «Энерджинет» Национальной технологической инициативы» характеризует неэффективность электроэнергетического сектора как «ключевой вызов для России», «обострение» которого связано с тем, что современные потребители становятся всё более требовательными в отношении доступности, надёжности и качества электроэнергии [11].

В нашем исследовании сделан акцент на те интернет-ресурсы, где, в частности, рассматривается конкретная возможность снижения рас-

ходов потребителя энергии (например, экономическая целесообразность замены устаревших источников света новейшими лампами на базе мощных светодиодов [12].

Было проведено он-лайн анкетирование стейкхолдеров и экспертов по исследуемым вопросам, в котором участвовало более 60-ти предприятий – участников рынка электроэнергии. Результаты анкетирования позволили сделать ряд выводов: 22 % экспертов полагают, что проблемы качества электроэнергии (КЭ) можно решить нормативно-правовыми методами, а 33 % возлагают надежды на так называемый «технологический» комбинированный подход; почти половина экспертов (44 %) указывают на дефицит нормативно-правовых стимулов для решения проблем КЭ. Различные категории участников рынка электроэнергии в разной мере заинтересованы в исследовании и решении проблем КЭ. Отказы принять участие в исследовании часто мотивируют незначительностью проблемы. Особенно характерно это для производителей электроэнергии. Например, Ассоциация «Совет производителей энергии» вообще категорически отказалось предоставить экспертов и участвовать в экспертных и проектных мероприятиях (декларируется, что «члены Ассоциации «Совет производителей энергии» объединяют около 70 % установленной мощности Единой энергосистемы России»). Сомнения в целесообразности исследований часто высказывают и представители сетевых компаний. Более заинтересованной группой являются потребители электроэнергии, и данный вопрос подробно исследуется в рамках настоящей статьи.

Аналогичные данные он-лайн анкетирования имеют место и в отношении нерационального освещения объектов, которые наиболее часто используют физические лица – потребители электроэнергии (так, в коридорах и тамбурах до 80 % времени освещение включено при отсутствии людей) [1].

Некоторые наиболее популярные сайты крупнейших компаний – фактических монополистов в части работы с потребителями розничного рынка (например, Объединённой Энергетической Компании (ОЭК): neco.ru/peredacha-elektricheskoy-energii/ uchet-elektricheskoy-energii) были не

только изучены авторами статьи, но и использованы одним из них в практических целях для первичного подключения потребителя – гражданина к электрическим сетям, что выявило ряд сложностей при их практическом применении.

3. Цели и методы исследования

Можно выделить следующие основные цели проведённого в рамках настоящей статьи исследования:

1. Выявление путей оптимизация правового регулирования деятельности, статуса и взаимоотношений участников рынка электроэнергии (в первую очередь, розничного рынка). В этом контексте можно обнаружить достаточно существенные, по мнению авторов статьи, проблемы и коллизии. Так, базовый закон в части регулирования анализируемых общественных отношений – Федеральный закон от 26.03.2003 (с изм. и доп.) № 35-ФЗ «Об электроэнергетике» – не содержит среди основных понятий термин «электроэнергия». Соответственно, для формулировки определения электрической энергии – а именно этот «товар» получает потребитель – приходится обращаться к ГОСТ Р 52002–2003 [13], где содержится более «технократическое», нежели правовое, определение.

Однако данная исследовательская задача носит широкий характер и может конкретизироваться в части формирования теоретических выводов и практических предложений по повышению уровня правовой защищённости наибольшей по численности категории субъектов анализируемых правоотношений – потребителей электроэнергии.

Гарантии для потребителей электроэнергии содержатся в ст. 38 «Закона об электроэнергетике» (запрещается при отсутствии задолженности ограничение режима потребления, в том числе так называемые веерные отключения), и они детализируются подзаконными нормативными правовыми актами, прежде всего, актами Правительства (последние фактически устанавливают единственный реальный, хотя и явно нуждающийся в конкретизации (установлены показатели в пределах от 670 кВт до 759 кВт), критерий для «юридического разграничения» оптового и розничного рынков электроэнергии.

2. Исследование практики применения вышеуказанных и иных нормативных правовых актов, в процессе которой может существенно искажаться изначальный смысл и/или цель принятого законодателем акта; особую настороженность у авторов статьи вызывают ситуации, когда это приводит к умалению прав и законных интересов субъекта, в отношении которого установлены особые дополнительные гарантии правовой защиты (например, в законодательстве о защите прав потребителей). В силу указанного фактора обоснованность постановления такой исследовательской цели требует дополнительной аргументации.

Так, изучение судебной практики позволяет сделать вывод о том, что многие позиции судов по изучаемой проблематике носят противоречивый характер. Первоначально отметим те из них, в отношении которых в 2019 г. сформированы позиции Верховного Суда России, что позволяет надеяться на появление устойчивого вектора судебной правоприменительной деятельности (спорные позиции будут частично охарактеризованы в дальнейшем).

Только недавно были сформированы позиции, которые обеспечивают более высокий уровень правовой защиты потребителя как наиболее уязвимой (слабой) стороны правоотношений на изучаемом рынке. Определение от 23.05.2019 № 305-ЭС18-26293 по делу № А40-200484/2017 содержит позицию, согласно которой если абонент утверждает, что энергопоставляющая организация не опломбировала прибор учёта, то именно она должна доказать обратное. Довод о том, что абонент, обнаруживший отсутствие пломб, должен обратиться к сетевой или энергопоставляющей организации, несостоятелен.

Наибольшее количество споров и противоречивые судебные акты обуславливала ситуация, связанная с вопросом о том, имеет ли потребитель право обжаловать уведомление об ограничении режима энергопотребления. Можно лишь выразить надежду на то, что ориентиром для всех судов станет позиция, выраженная в Определении от 15.04.2019 по делу № 306-ЭС18-20653, А57-25248/2017, согласно которой потребитель имеет право обжаловать уведомление об ограничении режима энергопотребле-

ния, а суды обязаны проверить, обоснованно ли направлено уведомление, оценив причины возникновения задолженности.

Аналогичный вывод можно сделать и в отношении судебного акта от 23.05.2019 № 309-ЭС18-24456 по делу № А60-64563/2017: Верховный Суд разъяснил, с какого момента считать период неучтённого потребления электроэнергии, если между датой последней плановой проверки прибора учёта и датой выявления такого потребления прошло больше года. Нужно руководствоваться датой, когда должна была состояться плановая проверка, ближайшая к моменту выявления неучтённого потребления.

Однако противоречивых судебных позиций значительно больше: например, такая ситуация имеет место по вопросу о том, какие правовые нормы применяются к договору о передаче (транспортировке) электроэнергии. Ряд судов исходит из того, что правоотношения по передаче электроэнергии сетевой организацией регулируются нормами о возмездном оказании услуг. Так, в акте высшей судебной инстанции от 27.09.2018 № 305-ЭС18-8863 по делу № А40-49067/2017 указано, что «...Правоотношения по передаче электроэнергии опосредуются публичным договором о возмездном оказании услуг...».

Согласно второй позиции, правоотношения по передаче электроэнергии сетевой организацией регулируются нормами о возмездном оказании услуг (гл. 39 ГК РФ) с учётом положений о договоре энергоснабжения (§ 6 гл. 30 ГК РФ). Так, в Постановлении Арбитражного суда Центрального округа от 11.04.2018 № Ф10-1051/2018 по делу № А36-9002/2015 указано: «... сложившиеся между сторонами отношения арбитражными судами правильно квалифицированы как правоотношения, возникшие из договора возмездного оказания услуг, урегулированные главой 39 Гражданского кодекса Российской Федерации...».

Устранение указанных и иных противоречий является неотъемлемым элементом совершенствования правового регулирования рынка электроэнергии и защиты прав потребителей (абонентов).

3. Третья исследовательская цель безусловно сопряжена с вышеуказанными, но выделяется в силу её наи-

большей значимости для потребителей электрической энергии. Она связана с совершенствованием системы мониторинга, контроля и учёта качества электрической энергии, внедрением принципиально нового оборудования (датчиков, анализаторов и пр.), которое должно соответствовать определённым функциональным требованиям (точность показаний) и ценовым (доступность для потребителя) критериям. Перспективными являются те технические решения, которые предполагают внедрение комплексов интеллектуального управления сетью и, на наш взгляд, носят максимально доступный, не требующий сложных математических вычислений, характер для потребителя (абонента).

Данная цель предполагает выявление взаимосвязи процессов защиты потребителей (абонентов) электроэнергии и одного из наиболее «энергоёмких» объектов освещения муниципальных образований. К конкретным теоретическим и прикладным аспектам этой проблемы мы обратимся в дальнейшем.

Методологическую основу работы составил комплекс методов научного познания. Однако авторы статьи полагают необходимым акцентировать внимание на том обстоятельстве, что применительно к изучаемой проблематике использование математических методов является не «самоцелью», «модной потребностью» в симбиозе юридических и технических исследований, а реальной потребностью, обусловленной содержанием соответствующих нормативных правовых актов. В качестве примера обратимся к Постановлению Правительства РФ от 06.05.2011 № 354 «О предоставлении коммунальных услуг собственникам и пользователям помещений в многоквартирных домах и жилых домов», согласно которому размер платы за электроэнергию на общедомовые нужды определяется по формуле:

$$P_i^{одн} = V_i^{одн} \times T^{кр},$$

где $V_i^{одн}$ – количество электроэнергии, предоставленное за расчётный период на общедомовые нужды в многоквартирном доме и приходящееся на конкретное помещение; $T^{кр}$ – тариф на электроэнергию, установленный в соответствии с законо-

дательством субъекта РФ. При этом применительно к потребителям метод расчёта существенно усложняется.

Полагаем, что данная методика явно имеет достаточно сложный характер, особенно при использовании её потребителями электрической энергии. Так, различные подходы на практике к вышеупомянутому вопросу о том, создаёт либо нет истечение межповерочного интервала прибора учёта безучётное потребление электроэнергии, обусловлены в том числе и этим обстоятельством.

На сайте Объединённой энергетической компании pесо.ru/peredacha-elektricheskoy-energii/uchet-elektricheskoy-energii содержится предназначенный именно для «частных потребителей» раздел с методикой расчёта режима предлагаемого потребления; к сожалению, разобраться в этой методике, выбрать необходимый режим и, соответственно, стоимость предполагаемых услуг без привлечения специалиста потребителю невозможно, в чём лично убедился один из авторов статьи. Аналогичные выводы можно сделать и в отношении других разделов этого сайта, таких как «I. Требования в части мест установки приборов учёта», «II. Требования в части метрологических характеристик» и т.п.

Что касается упомянутого выше вопроса взаимосвязи процессов защиты потребителей (абонентов) электроэнергии и одного из наиболее «энергоёмких» объектов освещения муниципальных образований, то, на наш взгляд, правовое регулирование последнего института носило ранее достаточно чёткий и непротиворечивый характер.

Так, в Федеральном законе от 28.12.2013 № 443-ФЗ «Об общих принципах организации местного самоуправления в Российской Федерации» утратили силу положения, где к вопросам местного значения была прямо отнесена обязанность освещения улиц (п. 21. ст. 14 «организация освещения улиц и установки указателей с названиями улиц и номерами домов» более не применяется). В настоящее время в указанном нормативном правовом акте имеет место только ст. 45.1 (введена Федеральным законом от 29.12.2017 № 463-ФЗ) с достаточно, по нашему мнению, неопределённым характером уста-

новления анализируемой обязанности («Правила благоустройства территории муниципального образования утверждаются представительным органом соответствующего муниципального образования. Правила благоустройства территории муниципального образования могут регулировать вопросы:...4) организации освещения территории муниципального образования, включая архитектурную подсветку зданий, строений, сооружений»).

4. Результаты исследования

4.1. В целях оптимизации правового регулирования рынка электроэнергии в целом и повышения правовых гарантий защищённости соответствующего потребителя полагаем целесообразным дополнить ст. 3 Федерального закона от 26.03.2003 № 35-ФЗ «Об электроэнергетике» термином «электрическая энергия – поставляемый оптовому потребителю или розничному потребителю (абоненту) в соответствии со ст. 539 ГК РФ технически сложный товар (совокупность заряженных частиц – носителей элементарного электрического заряда)», поскольку отсутствие этого термина среди основных понятий может привести к неоднозначному толкованию положений этого Федерального закона.

4.2. В целях защиты потребителей (абонентов) от ненадлежащего исполнения обязательств, связанных с предоставлением электрической энергии (мощности), предлагаем:

1) дополнить пункт 1 статьи 13 Федерального закона от 23.11.2009 № 261-ФЗ «Об энергосбережении и о повышении энергетической эффективности и о внесении изменений в отдельные законодательные акты Российской Федерации» словами: «требования к характеристикам приборов учёта, в том числе к качеству используемых энергетических ресурсов, определяются в соответствии с законодательством Российской Федерации»;

2) в Федеральном законе от 28.12.2013 № 443-ФЗ «Об общих принципах организации местного самоуправления в Российской Федерации» закрепить положение о том, что к вопросам местного значения относится обязанность освещения улиц;

3) внести в раздел X «Правил предоставления коммунальных услуг собственникам и пользователям помещений в многоквартирных домах и жилых домов», введённых Постановлением Правительства РФ от 06.05.2011 № 354 (ред. от 13.07.2019), изменения и дополнение в части фиксации предоставления коммунальной услуги ненадлежащего качества, касающейся качества электрической энергии;

4) внести в ведомственные нормативные правовые акты, в частности, в Правила учёта электрической энергии, утверждённые Минтопэнерго РФ и Минстроем РФ 19.09.1996 и 26.09.1996 соответственно, изменения в части учёта качества электрической энергии;

5) внести в введённые Постановлением Правительства РФ от 04.05.2012 № 442 «Основные положения функционирования розничных рынков электрической энергии» следующие изменения и дополнения: возложить на собственника прибора учёта качества электроэнергии обязанность по обеспечению эксплуатации установленного и допущенного к эксплуатации прибора учёта качества, сохранности и целостности такого прибора, а также пломб и (или) знаков визуального контроля, снятию и хранению его показаний и его своевременной замене;

6) внести в Приказ Минпромторга РФ от 21.01.2011 № 57 «Об утверждении методических рекомендаций по техническим требованиям к системам и приборам учёта воды, газа, тепловой энергии, электрической энергии» изменения и дополнения в части установления технических требований к системам и приборам учёта электрической энергии, касающиеся определения качества электрической энергии.

7) дополнить ст. 10 Федерального закона от 24.07.2007 № 209-ФЗ (ред. от 26.07.2019) «О развитии малого и среднего предпринимательства в Российской Федерации» положением следующего содержания: «16) В субъектах Российской Федерации, где не установлены тарифы и льготные социальные нормы потребления на электроэнергию для населения, органы государственной власти субъектов Российской Федерации не лишены полномочий по оказанию зарегистрированным в этих регионах

индивидуальным предпринимателям и главам крестьянских (фермерских) хозяйств осуществляющим производственную и (или) иную хозяйственную деятельность в области сельского хозяйства, поддержки в соответствии со ст. 25 Закона о развитии малого и среднего предпринимательства и ст. 2 Закона о крестьянском (фермерском) хозяйстве».

С учётом принятия в 2019 г. ряда имеющих принципиальное значение правовых позиций Верховного Суда России в отношении потребителей услуг электроэнергии, как охарактеризованных выше, так и некоторых других, представляется целесообразным принятие Постановления Пленума Верховного Суда РФ «О практике рассмотрения судами дел с участием потребителей электрической энергии».

Необходимость принятия такого постановления обусловлена в том числе и тем обстоятельством, что даже позиции Верховного Суда России не становятся ориентиром для обеспечения единства судебной практики (мы уже приводили такой пример – Определение Судебной коллегии по экономическим спорам Верховного Суда РФ от 27.09.2018 № 305-ЭС18-8863 по делу № А40-49067/2017) и, соответственно, такую задачу в соответствии со ст. 126 Конституции России (Верховный Суд Российской Федерации... даёт разъяснения по вопросам судебной практики) может выполнить высшая судебная инстанция, приняв указанный судебный акт.

В ином случае лишь «благими пожеланиями» будут, к сожалению, упования исследователей на то, что, к примеру, в период до усовершенствования закона и создания системы автоматизированного учёта судьи будут избегать формализма при разрешении конкретных дел. Арбитражным судам необходимо выработать новые подходы к безучётному потреблению в отношении добросовестных потребителей электроэнергии, не осуществлявших вмешательство в систему учёта, при отсутствии доказательств фактического искажения данных об объёмах потребления энергоресурсов, исходя при этом из того обстоятельства, что контрольные функции по учёту энергопотребления должны осуществлять профессиональные

энергетические компании. Недопустимо презюмировать вину потребителя за безучётное потребление электроэнергии вне зависимости от фактического состояния прибора учёта и добросовестности действий последнего.

И наконец, нам трудно не высказать пожелание в адрес администрации сайта Объединённой энергетической компании в части упрощения информации, адресованной гражданам; аналогичное суждение мы формируем и в отношении сложных методик расчёта потребляемой электроэнергии (см. Постановление Правительства РФ от 06.05.2011 № 354 (ред. от 13.07.2019) «О предоставлении коммунальных услуг собственникам и пользователям помещений в многоквартирных домах и жилых домов»), возможно, уместных, для субъектов оптового анализируемого рынка, но не потребителей (абонентов).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. <https://www.nevs.kremlin.ru>.
2. <https://econet.ru/articles/181522-umnoe-ulichnoe-osveschenie-pozvolit-sekonomit-do-70-zatrat-na-elektroenergiyu>.
3. *Гурин О.Ю., Романенко А.А.* Закупочный стоп-кран: что нужно знать об отмене закупки // Прогосзаказ.рф.– 2018.– № 8. – С. 14–22.
4. *Варламова А.Н.* Конкурентное право и отраслевые товарные рынки: рынок электроэнергии // Конкурентное право.– 2019.– № 2. – С. 9–13.
5. *Ручкина Г.Ф.* Качество электроэнергии: проблемы нормативного правового регулирования // Имущественные отношения в Российской Федерации.– 2018.– № 12. – С. 44–52.
6. *Малышенко Е.В.* О порядке установления льгот на электроэнергию для сельскохозяйственных предпринимателей // Государственная власть и местное самоуправление.– 2018.– № 11. – С. 44–48.
7. *Хорошева Н.В.* Безучётное потребление электроэнергии в связи с истечением межповерочного интервала: проблемы правоприменительной и судебной практики, пути их решения // Вестник арбитражной практики.– 2018.– № 4. – С. 58–69.

8. *Камышанский В.П., Серебрякова С.А.* Ограничение режима потребления электрической энергии: социально-правовой аспект // Власть Закона.– 2018.– № 1. – С. 231–238.

9. *Канцер Ю.А.* Ресурсоснабжение жилищно-коммунального хозяйства России: вопросы теории и практики, отв. ред. В.А. Вайпан. – М.: Юстицинформ, 2017.– 196 с.

10. *Свирков С.А.* Основные проблемы гражданско-правового регулирования оборота энергии. Монография. – М.: Статут, 2013.– 479 с.

11. Энергетическое право России и Германии: Сравнительно-правовое исследование / Под ред. Ф.Ю. Зеккера, П.Г. Лакно. – М.: Юрист, 2011.– 1076 с.

12. <http://komitet2-13.km.duma.gov.ru/Novosti-Komiteta/item/16425224/16>.

13. ГОСТ Р 52002–2003 «Электротехника. Термины и определения основных понятий».



Ручкина Гульнара Флоровна,

доктор юридических наук, профессор. Руководитель Департамента правового регулирования экономической деятельности (ДПРЭД) Финансового

университета при Правительстве Российской Федерации (Финуниверситет), Москва



Павликов Сергей Герасимович,

доктор юридических наук, профессор. Профессор ДПРЭД Финуниверситета, Москва



Матвеева Елена Юрьевна, кандидат

юридических наук. Доцент ДПРЭД Финуниверситета, Москва

Система облучения для автоматизированной многоярусной фитоустановки типа «City Farm»

В. Г. ТЕРЕХОВ,

ВНИСИ им. С.И. Вавилова, Москва
E-mail: terekhov@vnisi.ru

Аннотация

Современная светотехника готова вносить свой вклад в создание новых автоматизированных и, в ближайшем будущем, полностью компьютеризированных производств, основанных на использовании искусственного облучения для технологических целей.

Речь идёт о выращивании растений по технологии светокультуры в многоярусных фитоустановках со спектральными характеристиками и уровнем облучения, учитывающими вид растения и задачи выращивания. При этом основной вид растений для этих установок – салатно-зеленные культуры, потребление которых в России значительно отстаёт от рекомендуемых норм, особенно в холодное время года.

В статье рассмотрены основные характеристики облучателей со светодиодами и систем освещения на их основе для выращивания салатно-зеленных растений в автоматизированных многоярусных фитоустановках в условиях светокультуры. Примером подобных фитоустановок служит созданная во ВНИСИ им. С.И. Вавилова работающая в автоматическом режиме исследовательская установка, не имеющая аналогов в России.

Принципиальное отличие используемых в этой установке облучателей – применение в них мультиком-

понентных светодиодных композиций на основе белых и цветных элементов, позволяющих варьировать в широких пределах спектральные характеристики в области ФАР. Установка в целом отличается современным аппаратурным оформлением и наличием компьютерного управления.

Ключевые слова: многоуровневая фитоустановка, фитооблучатель со светодиодами, облучательная установка, компьютерное управление, ФАР, светокультура, салатно-зеленные растения.

Введение

Появление и динамичное развитие СД техники явилось основой для создания принципиально новых исследовательских и производственных комплексов и установок автоматизированного многоярусного выращивания растений, получивших название «City Farm». По сути, речь идёт о новой прогрессивной технологии выращивания растений (в первую очередь, салатно-зеленных культур), применение которой решает важный вопрос рационального использования дорожающих площадей защищённого грунта, обеспечивает высокий уровень автоматизации технологического процесса и сокращает парк необходимых машин и механизмов по сравнению с типовой тепличной технологией. Применение

многоярусных фитоустановок (МФУ) возможно непосредственно в городских условиях, что сокращает логистические расходы. Поэтому МФУ весьма перспективны не только в мегаполисах нашей страны, но и в большом количестве малых городов и посёлков, позволяя снабжать население, особенно, в холодное время года свежей и богатой витаминами овощной продукцией¹.

МФУ для выращивания растений по технологии светокультуры имеют существенные отличия от традиционных сооружений защищённого грунта (теплиц) и заслуживают приво-димого ниже специального рассмотрения не только для анализа необходимых светотехнических решений для МФУ производственного типа, но и – обсуждения (с учётом первых полученных результатов) возможности реализации исследовательских программ фотобиологического направления.

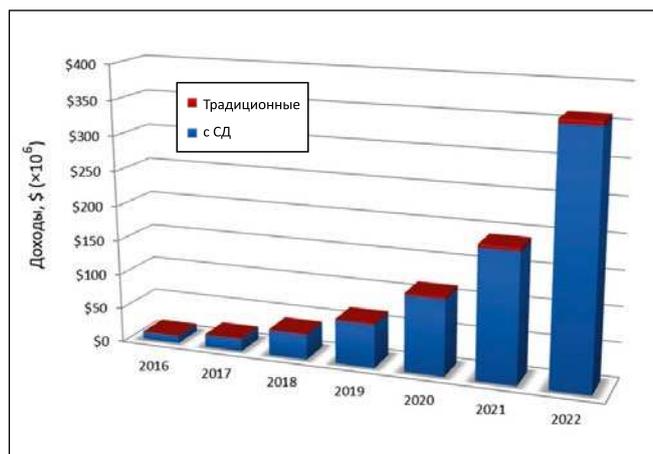
Технологическое облучение в многоярусных фитоустановках

Фитооблучатели с СД (СДФО) для МФУ, состоящих из компактных модулей (ярусов), не имеют конкурентов. Люминесцентные ртутьсодержащие лампы не могут использоваться в фитоустановках по экологическим соображениям, а НЛВД неприменимы из-за высокой концентрации мощности и высокой температуры на колбе лампы.

Возможности создания любого спектра в области ФАР (400–700 нм) при высоком уровне параметров излучения, достаточно простое и эффективное регулирование спектра и уровня облучения привели к динамичному развитию фитонаправления в научных и производственных программах ведущих производителей СД – CREE (США), Opto Semiconductors (ФРГ), Lumileds (Нидерланды) и др. – и светотехнических фирм – Signify (Нидерланды), Valoya (Финляндия), МСК «БЛ ГРУПП» (Россия), Current-GE (США), IGROX (Италия) и др.

Характерно, что в глобальном прогнозе по темпам развития в мире СДФО для защищённого грунта спе-

Рис. 1. Развитие в мире систем вертикального многоярусного облучения типа «City Farm» со светодиодами и «традиционными» ИС



¹ Отметим, что в 1980–90-х гг. работы по созданию МФУ в России велись [1], но не были завершены, в основном, из-за отсутствия тогда излучателей уровня современных СД источников излучения.

Рис. 2. Примеры фитооблучателей со светодиодами:
а – серия «WAVE» (18–105 Вт), фирма IGROX; б – серия «L» (14÷35 Вт), фирма Valoya

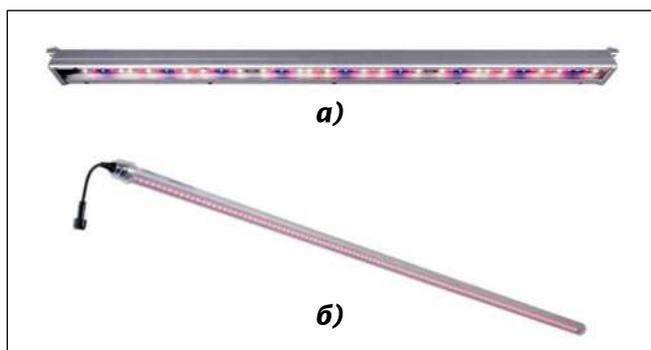


Рис. 3. Фитооблучатели со светодиодами серии «GALAD Арклайн Фито LED» мощностью 30 и 60 Вт, предназначенные для МФУ



циалисты *Strategies Unlimited* (США) считают, что объём облучения СДФО в «City Farm» к 2022 г. увеличится ~ в 7 раз (рис. 1) [2]. Данные оценки разделяются и в России: так, уже в 2017 г. вопросы облучения СДФО в МФУ нашли отражение в новых нормативных документах [3].

Характеристики СДФО разных фирм достаточно разнообразны; это связано в основном с тем, что требования к спектрам фитооблучения для конкретных видов растений находятся в стадии формирования; также далеки от унификации габариты модулей МФУ, не совсем ясны ещё и реальные данные о стабильности излучательных характеристик СДФО в процессе эксплуатации.

Тем не менее можно в общем считать, что основные параметры СДФО для МФУ следующие:

- электрическая мощность: 30–70 Вт;
- спектры излучения: бинарный (*RB* – красно-синий с разной долей каждого компонента) или приближённый к «белому» с разной долей «зелёного» компонента;
- фотосинтетическая фотонная эффективность (*EPPF*): 2,0–2,7 мкмоль/Дж (в зависимости от типа спектра), при этом её максимальное значение – для бинарного (*RB*) типа спектра;
- габаритная длина: ~ 120 см (что связано с наиболее распространённой шириной модуля МФУ);
- удельная электрическая мощность (на единицу длины): 0,25–

0,75 Вт/см (содержит косвенную информацию о температуре СД кристалла и его возможном ресурсе);

- степень защиты оболочки: *IP54*, *IP66*.

СДФО для МФУ предлагается в двух исполнениях (рис. 2):

- в виде протяжённого узкого облучателя с алюминиевым корпусом, поликарбонатным рассеивателем и пассивным охлаждением;
- в виде узкой трубки диаметром 26–28 мм из поликарбоната, как лампа прямой замены («ретрофит») ЛЛ.

В последнее время второй вариант получает большее распространение.

Во ВНИСИ им. С.И. Вавилова совместно с КЭТЗ в 2018 г. для МФУ разработана серия СДФО «GALAD Арклайн Фито LED» мощностью 30 и 60 Вт (рис. 3) в двух спектральных вариантах: с *EPPF* 2,1 мкмоль/Дж у варианта с «белым» излучением ($T_{кц} = 3700$ К) и 2,5 мкмоль/Дж у варианта с *RB* спектром. Габариты СДФО: 1201×115×67 мм, степень защиты: *IP65*.

Следует отметить, что ОУ для МФУ имеют ряд характерных отличий от традиционных ОУ для теплиц, связанных, в частности, с тем, что расстояние от ФО до плоскости посадки не превышает 60 см, а в конце вегетации салатно-зеленных культур последние могут отстоять от ФО на 10–20 см. Поэтому весьма важно, чтобы температура поверхности ФО не превышала 80 °С, а тепловая составляющая баланса ФО не вызывала перегрев корневой зоны следующего (верхне-

го) яруса МФУ. Светораспределение СДФО должно обеспечивать равномерное распределение облучённости по технологической площади.

Уровни облучения и спектральные характеристики облучения в МФУ целесообразно выбирать на основе результатов фотобиологических исследований (в нашем случае на базе работ [4, 5]). Иногда, при существенных отличиях растений от исследованных, целесообразно проведение дополнительных экспериментов для выработки «светотехнического рецепта» эффективного выращивания конкретных растений².

В общем энергорасходе МФУ доля технологического облучения, как и у теплиц со светокультурой, превышает 90 %, и потому фактор энергоэкономичности облучения может быть отнесён к числу важнейших.

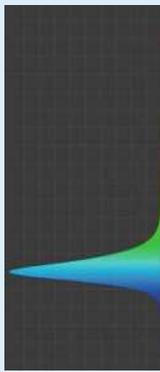
Исходным пунктом построения СДФО служит правильный выбор параметров используемых СД. В частности, возможно большей световой отдачей (лм/Вт) для квазимонохроматических СД, определяющей уровень *EPPFD* СД.

Комплексным показателем энергоэффективности ОУ для ФУ (в т.ч. МФУ) может [6] являться отношение $EPPFD_{oy} = PPF D_{cp} / P_1$ (мкмоль/Дж), где $PPFD_{cp}$ – средняя *PPFD* на исследуемой поверхности, мкмоль/(с·м²), P_1 – удельная установленная электрическая мощность ОУ, Вт/м².

Отдельного рассмотрения заслуживает вопрос присутствия в спектре ФО излучения в дальнем красном диапазоне (700–780 нм) – за пределами ФАР. Это излучение для фотосинтеза не используется и не оказывает на растение энергетического воздействия, но, возбуждая активную форму растительного пигмента фитохрома Φ_{730} , регулирует фотоморфогенез растения. Влияние этого спектрального диапазона на рост и развитие растений в настоящее время исследуется, что делает желательным его наличие в спектре излучения ФО, предназначенных для исследовательских программ.

² При этом светотехнические параметры ФО и ОУ должны приводиться в фотосинтетических фотонных единицах в соответствии с ГОСТ Р 57671–2017 «Приборы облучательные со светодиодными источниками света для теплиц. Общие технические условия».

Номинальные параметры светодиодов, используемых в МФУ во ВНИСИ им. С.И. Вавилова*

Номер канала	Тип СД (фирма CREE)	Доминантная длина волны, нм	Ток, мА	Напряжение, В	Интенсивность излучения	Спектр
1	XPE BGR-L1-0000-00F01	620–630	350	2,2	1,1	
2	XPE BRD-L1-0000-00801	650–670	350	2,2	PPF , мкмоль/с	
3	XPE EPR-L1-0000-00C01	720–740	350	2,2		
4	XPE BBL-L1-0000-00Z01	465–485	350	3,2		
5	XPG DWT-U1-0000-00FE5	400–700 (4000 К)	350	3,2	Φ_{λ} лм	
6	XPG DWT-B1-0000-00LE3	400–700 _{нм} (5000 К)	350	3,2		

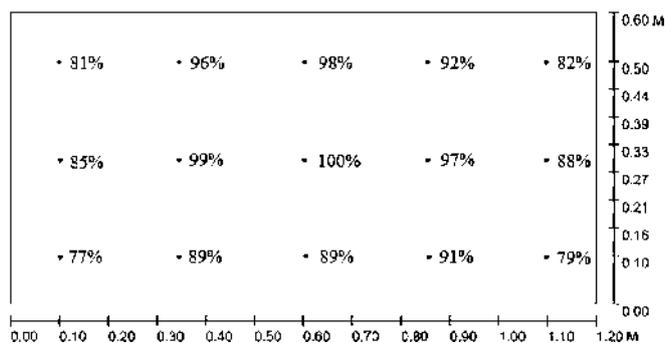
* По данным производителя, на сайте www.cree.com.

Блок-схема установки



Рис. 4. Блок-схема МФУ

Рис. 5. Уровень равномерности облучения технологической зоны



ОУ для вертикальной МФУ во ВНИСИ

Во ВНИСИ им. С.И. Вавилова спроектирована, изготовлена и введена в действие автоматизированная вертикальная МФУ для проведения фотобиологических исследований с использованием новейших СД излучателей и методов регулирования режимов облучения растений. Другая задача исследовательской МФУ – способствовать разработке требований к основным светотехническим параметрам ФО и ОУ при светокультуре растений.

Как видно из рис. 4, МФУ содержит три светоизолированных блока (моду-

ля) с четырьмя расположенными в них друг над другом секциями площадью по $0,72 \text{ м}^2 (1,2 \text{ м} \times 0,6 \text{ м})^3$, в которых одновременно можно выращивать до 264 растений. В каждой секции установлено по два шестиканальных управляемых ФО на базе «GALAD Арклайн Фито-72», которые позволяют создавать практически неограниченное число комбинаций спектров излучения. Характеристики СД каждого канала приведены в таблице. Мощность каждого ФО может меняться от 12,5 до 50,0 Вт. Максимальная мощность всей ОУ – 1200 Вт, а соответствующая

³ Общая технологическая площадь всей МФУ – 8,64 м².



Рис. 6. Стадии вегетации салата

ей удельная электрическая мощность ОУ – 140 Вт/м². Максимальная *PPFD* на технологической площади ОУ – до 320 мкмоль/(с·м²). Достигнута высокая равномерность облучения (рис. 5).

Измерения спектральных характеристик ОУ и уровня облучения производятся с помощью приборов фирм *Li-COR* (США) и *UPRtek* (Тайвань).

Перед проведением каждой вегетации выполняется юстировка ОУ регулированием спектральных и излучательных характеристик ФО по протоколу «DMX512» посредством специальной схемы управления, содержащей персональный компьютер с адаптером «USB – DMX 512 RDM» и программное обеспечение «RDM Controller 2.0». По результатам процедуры выбора спектра таблица значений уровней каналов вводится в контроллер управления «БРИЗ-DMX», работающий совместно с таймером реального времени «БРИЗ-РВ».

Возможности задания разных спектральных комбинаций в МФУ практически не ограничены. Методика и процедура их выбора апробированы нами в исследованиях эффективности разных диапазонов ФАР на традиционных установках в фитотроне [5].

МФУ работает полностью в автоматизированном режиме, с постоянным контролем за параметрами ключевых систем выращивания: климатической установки, растворного узла и ОУ. Дистанционная система мониторинга и управления через Интернет позволяет с помощью любого устройства (персонального компьютера, смартфона или планшета) через *web*-интерфейс в реальном времени отслеживать ход вегетации, и, при необходимости, менять параметры и режимы выращивания.

Посредством специальных миниатюрных видеокамер «*HIKVISION DS-2CD1031*» и «*GoPro Session5*», установленных в модулях, производится постоянный дистанционный контроль за состоянием и развитием растений. Имеется возможность фе-

Рис. 7. Выращивание салата в МФУ во ВНИСИ им. С.И. Вавилова



нологических наблюдений за растениями на разных стадиях вегетации (рис. 6); их результаты в дальнейшем могут учитываться в регулировании спектра излучения ОУ в процессе онтогенеза.

Резюмируя сказанное, отметим, что созданная автоматизированная установка для выращивания растений в контролируемых условиях создаёт принципиально новые возможности для проведения фотобиологических исследований: сокращает сроки экспериментов, расходы на их проведение и минимизирует долю рутинного обслуживания при непосредственном участии человека.

Заключение

С апреля 2019 г. МФУ во ВНИСИ им. С.И. Вавилова работает в режиме тестовой эксплуатации с вариацией спектральных характеристик и уровня облучения. До настоящего времени прошло несколько вегетаций разных сортов листового салата и зеленых растений. Полученные результаты по продуктивности культур на

30–40 % выше, чем на салатных линиях промышленных теплиц с технологией светокультуры, что служит прямым подтверждением высокой эффективности принятых светотехнических решений и других параметров микроклимата в МФУ (рис. 7).

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

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Тихомиров А.А., Шарунич В.П., Лисовский Г.М. Светокультура растений: биофизические и биотехнологические основы. – Новосибирск: Изд. Сиб. отд. РАН, 2000. – 213 с.

2. Smallwood P. Tracking the Horticultural SSL Market and Technology // Horticultural Lighting Conference, – USA, – 2017, – Denver, Colorado.

3. Боос Г.В., Прикупец Л.Б., Розовский Е.И., Столяревская Р.И. Стандартизация светотехнических приборов и установок для теплиц // Светотехника. – 2017. – № 6. – С. 69–74.

4. 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-зеленных культур // Светотехника. – 2018. – № 5. – С. 6–12.

5. Прикупец Л.Б., Боос Г.В., Терехов В.Г., Тараканов И.Г. Оптимизация светотехнических параметров при светокультуре салатно-зеленных растений с использованием светодиодных излучателей // Светотехника. – 2019. – № 4. – С. 6–13

6. Прикупец Л.Б. Технологическое освещение в агропромышленном комплексе России // Светотехника. – 2017. – № 6. – С. 6–14; Prikupets L.B. Technological Lighting for Agro-Industrial Installation in Russia // Light & Engineering. – 2018. – Vol. 26. – No. 4. – P. 7–17.



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

Новым генеральным директором АПСС стала Ольга Грекова

6 сентября 2019 г. состоялось Общее собрание членов Ассоциации производителей светодиодов и систем на их основе (АПСС), в ходе которого в связи с окончанием срока полномочий Правления АПСС, проведены выборы генерального директора и членов правления. Новым генеральным директором ассоциации стала Ольга Александровна Грекова.

Общее собрание определило вектор развития Ассоциации на ближайшие 2 года, направленный на развитие углубленного взаимодействия и сотрудничества со всеми заинтересованными сторонами, вовлеченными в деятельность на светотехническом рынке. Особое внимание предложено уделить аспектам взаимодействия с общественными организациями, а также смежными профессиональными сообществами. В рамках указанного вектора развития выделены семь направлений работы

Ассоциации, конкретные планы по реализации которых в настоящее время прорабатываются Правлением Ассоциации.

Единодушным решением Общего собрания Е.В. Долину, бесценно занимавшему пост генерального директора АПСС с момента её основания, вынесена благодарность, а также подписано представление в Министерство промышленности и торговли РФ о награждении Почетной грамотой «За вклад в развитие отечественной светодиодной промышленности».



russia-led-ssl.ru
09.09.2019

Зависимость цветового предпочтения от коррелированной цветовой температуры, освещённости и насыщенности цвета объекта – новая метрика¹

К. Т. ВИНЬ¹, П. БОДРОГИ^{1,3}, Т. К. КХАН¹, Т. Т. АНЬ²

¹ Дармштадтский технический университет, Дармштадт, Германия.

² Университет социальных и гуманитарных наук, Вьетнамский национальный университет, Ханой, Вьетнам.

³ E-mail: bodrogi@lichttechnik.tu-darmstadt.de

Аннотация

Предложена новая метрика ($R_{p,2019}$) для источников света, позволяющая прогнозировать субъективное восприятие интерьеров с цветными объектами, освещёнными этими источниками света. Эта метрика основана на индексе точности воспроизведения цвета МКО 2017 г. (*CIE2017 Colour Fidelity Index*) и векторной диаграмме цветов (*Colour Vector Graphic*) из *TM-30-15*. Помимо учёта насыщенности цвета объекта, эта метрика включает в себя учёт коррелированной цветовой температуры и освещённости на плоскости, на которой расположены цветные объекты. На шкале метрики отмечены качественные оценки цветового предпочтения, такие как «хорошо» или «очень хорошо». Цель введения этой метрики состоит в том, чтобы помочь проектировщикам освещения определить освещённость, коррелированную цветовую температуру и насыщенность цвета объекта, необходимые для достижения «хорошего» или «очень хорошего» уровня цветового предпочтения

Ключевые слова: качество цвета, цветовое предпочтение, метрика цветового предпочтения, точность воспроизведения цвета, цветовая гамма, насыщенность цвета, коррелированная цветовая температура, освещённость

1. Введение

Понятие «качество цветопередачи источника света» может быть определено как качественная оценка субъективного восприятия цветового облика цветных объектов в интерьерах, освещаемых этим источником света.

Хотя качество цветопередачи является лишь одним из аспектов качества освещения, оно играет важную роль во внутреннем освещении для обеспечения удовлетворённости пользователей освещением в целом. Другие аспекты качества освещения включают в себя яркость, чёткость зрительного восприятия (чёткую различимость структур поверхностей объектов), отсутствие блёскости и различимость теней объектов. Качество цвета имеет несколько подаспектов [1, 2], включая:

- естественность цвета [2–5]: сходство цвета объекта, освещаемого заданным источником света, с его цветом при естественном освещении;
- цветовое предпочтение [2–7] (определено ниже);
- «живость» цвета (*colour vividness*) [2–4, 8]: мера того, насколько насыщенным выглядит цвет цветного объекта;
- сходство цветов объектов с цветами в долговременной памяти человека [9]: цвета объектов, часто встречавшихся в прошлом, сохраняются в памяти, например, цвета бананов, травы или кожи;
- способность к различению цветов [10–12]: способность зрительной системы человека различать цвета сходного оттенка, например, двух образцов зелёного цвета с чуть более или с чуть менее синеватым оттенком;
- цветовая гармония: ощущение цветовой гармонии связано с эстетическим восприятием цветовых сочетаний; например, красный и оранжевый или зелёный, синий и жёлтый рядом друг с другом. Цветовой гармонии посвящено много публикаций.

Если исходить из простого и вполне понятного определения цветового предпочтения, то из перечисленных подаспектов наиболее важным для светотехники является именно оно.

Этот термин может быть определён как «субъективная оценка того, насколько наблюдателю *нравится* цветовой облик находящихся в помещении объектов, освещаемых *данным источником света*, причём во внимание принимаются все цветные объекты» [1, 2, 13]. Важным моментом является то, что цветовые предпочтения наблюдателей применительно к различным источникам света зависят от воспринимаемой картины или области применения освещения, например, освещение ресторана, офиса, дома или супермаркета [14].

На цветовые предпочтения наблюдателей при восприятии ими интерьеров с искусственным освещением влияют следующие параметры осветительной установки:

1. Сдвиги воспринимаемой чистоты и тонов (*chroma shifts and hue shifts*) цветов объектов (или цветных образцов) между исследуемым источником света и используемым для сравнения образцовым источником света – см. векторную диаграмму цветов, представленную в *TM-30-15* [2–5, 7, 13, 15]. На этой векторной диаграмме можно увидеть, как изменяется цветовой облик различных выбранных цветов (цветных образцов), если вместо фактического (исследуемого) источника света используется образцовый иллюминант (спектр естественного излучения или спектр излучения абсолютно чёрного тела).

2. Индекс точности воспроизведения цвета [2–5, 13, 16], который выражает численно, насколько цветовой облик цветных образцов, освещаемых исследуемым источником света, близок к их цветовому облику при освещении их образцовым иллюминантом с такой же коррелированной цветовой температурой (КЦТ).

3. Размер области, охватываемой цветовой гаммой (*colour gamut size*) [17, 18], который эквивалентен насыщенности цвета освещённых цветных объектов и зависит от спектра излучения источника света. Цветовая гамма излучения источника света показывается, сколько различных оттенков цветов, включая насыщенные, можно наблюдать при освещении объекта источником света с заданным спектром излучения. *Насыщенность цвета объекта* определяется спектром источника света: этот параметр показывает, насколько насыщенными в среднем объекты одного цвета вы-

¹ Перевод с англ. А.Г. Савицкой

Характеристики выбранных (новейших) метрик цветовых предпочтений. Понятие «насыщенность цвета» (насыщенность цвета объекта, освещаемого рассматриваемым источником света) эквивалентно размеру области, охватываемой цветовой гаммой

Метрика цветового предпочтения	Учитываемые параметры	Параметры, которые не учитываются	Колориметрическое описание	Цветные образцы
CQS Q_p [35]	Насыщенность цвета, КЦТ	Освещённость, форма цветовой гаммы	CIELAB	15 шт. [35]
CP [29]	Освещённость, насыщенность цвета, КЦТ	Форма цветовой гаммы	CIELAB	15 шт. [35]
LIKE [13]	Насыщенность цвета, форма цветовой гаммы	КЦТ, освещённость	TM-30-15 [15, 36]	TM-30-15 [15, 36]
MCRI [9]	Насыщенность цвета, форма цветовой гаммы (с использованием сохранённых в памяти цветов)	КЦТ, освещённость	Цветовое пространство IPT [37]	10 шт. [9]

глядят при освещении их источниками света с разными спектрами излучения.

4. Форма области, охватываемой цветовой гаммой (особенно размер области «насыщенного красного цвета» [13, 19–21]). Понятие формы области, охватываемой цветовой гаммой, можно пояснить следующим образом: если, например, в случае определённого спектра источника света, красноватые цвета кажутся более насыщенными, чем в случае другого спектра, то соответствующая область, охватываемая цветовой гаммой, расширяется в область красноватых цветовых тонов.

5. КЦТ источника белого света [2, 5, 21, 22], которая характеризует оттенок этого белого цвета: 2700 К соответствует имеющему желтоватый оттенок тёпло-белому свету, в то время как 7000 К соответствует имеющему слегка голубоватый оттенок холодн-белому свету.

6. Расстояние от точки, соответствующей излучению источника белого света, до линии чёрного тела или линии дневного света на диаграмме цветности, которое характеризуется параметрами Duv или $\Delta u'v'$ [21, 23–26]. Если это расстояние большое, то цвет источника света не будет белым – он будет визуально восприниматься как, например, имеющий мешающий зеленоватый оттенок.

7. Характерный уровень освещённости [27–29] на рабочей плоскости, на которой расположены цветные объекты.

Теперь следует более подробно остановиться на некоторых экспериментальных данных о влиянии на цветовые предпочтения трёх параме-

тров: КЦТ, насыщенности цвета объекта и освещённости (этот вопрос будет всесторонне рассмотрен в разделе 2). В [2] было установлено, что на цветное предпочтение влияет КЦТ освещающего цветные объекты белого света, который в соответствии с КЦТ характеризуется как тепло-белый, нейтрально-белый или холодно-белый: по субъективным оценкам, при *относительно высокой* КЦТ (4000 К) уровень цветового предпочтения был *выше*, чем при более низкой КЦТ (2500 К) при одном и том же уровне насыщенности цвета объекта, обеспечиваемом источником света. В другом исследовании [5] цветовые предпочтения были максимальными при КЦТ, примерно равной 5000 К (холодно-белый свет), а не при 3100 К (тёпло-белый свет). В [10, 30, 31] утверждалось, что другой, связанный с этим аспект качества освещения, а именно, предпочтительность сцены (*scene preference*) (общая субъективная оценка качества внутреннего освещения) *увеличивается* по мере увеличения освещённости (в этих исследованиях индексы точности воспроизведения цвета и насыщенности цветов объектов оставались неизменными, а цветовые предпочтения конкретно не рассматривались). В другом исследовании субъективные цветовые предпочтения оказались монотонно возрастающей функцией освещённости [32].

Проблема современных метрик цветовых предпочтений заключается в одном из следующих обстоятельств:

1. Они не учитывают зависимость цветового предпочтения от КЦТ и/или освещённости, и/или формы цвето-

вой гаммы (например, зависимость от уровня насыщенности красного цвета).

2. В них не используются новые важные колориметрические характеристики, которые появились в результате последних исследований в области колориметрии, включая новый индекс точности воспроизведения цвета, новое определение цветовой адаптации и новое цветовое пространство [15]. Соответственно, в табл. 1 приведено описание отобранных нами новейших метрик цветовых предпочтений. Другие метрики цветопередачи, включая цветовые предпочтения, были подробно описаны и проанализированы ранее [33, 34].

Как следует из табл. 1, в некоторых случаях зависимость цветового предпочтения от освещённости, КЦТ или формы цветовой гаммы не учитывается. Зависимость от формы цветовой гаммы включает в себя метрика *LIKE* [13], которая основана на результатах экспериментов с фиксированной КЦТ (3500 К) и с фиксированной освещённостью (646 лк). Индекс цветопередачи для хранящихся в памяти цветных объектов (*memory colour rendition index – MCRI*) [9] основан на экспериментах при 5600 К и 1150 лк, т.е. при фиксированных значениях КЦТ и освещённости. На основе анализа вышеупомянутых экспериментальных данных, свидетельствующих о значительном влиянии КЦТ и освещённости (помимо насыщенности цвета объекта) на цветовые предпочтения, было установлено, что полученную зависимость можно описать при помощи одной из предложенных ранее метрик (*CP*) [29]:

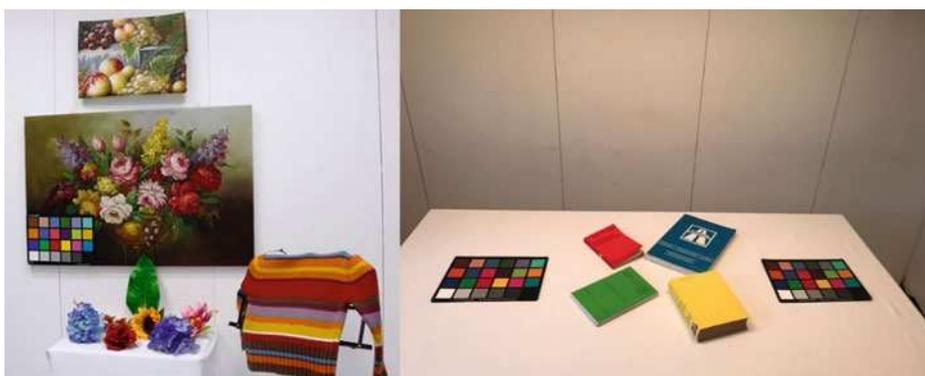


Рис. 1. Помещение с наборами разноцветных объектов, использовавшихся при проведении двух предыдущих исследований ([3] слева и [32] справа), которые легли в основу разработки предлагаемой новой метрики цветового предпочтения ($R_{p,2019}$). (Воспроизводится с разрешения журнала *Lighting Research and Technology*. На обеих фотографиях присутствуют копии карты цветов *MacBeth ColourChecker*®)

$$CP = (14,089 \cdot \ln(E_{v,eq}) - 25,397) \cdot [-0,003 \cdot \Delta C^*2 + 0,0252 \cdot \Delta C^* + 1,0192] + [-518,554 \cdot ((S/V)^{0,24})^2 + 864,872 \cdot (S/V)^{0,24} - 356,578], \quad (1)$$

где CP – цветовое предпочтение, $E_{v,eq} = E_v \cdot (S/V)^{0,24}$ – так называемая эквивалентная вертикальная освещённость [38], ΔC^* – насыщенность цвета объекта, S/V – относительный сигнал колбочек S -типа (фоторецепторов человеческого глаза, чувствительных к коротковолновому излучению), который можно использовать вместо КЦТ [29]. Входящая в уравнение (1) величина $(S/V)^{0,24}$ была рассчитана в [29] с достоверностью $r^2 = 0,99$ для нескольких спектров многокристалльных светодиодов (СД) на основе значения КЦТ. Расчёты производились с помощью уравнения (2), которым можно воспользоваться на практике, если значение $(S/V)^{0,24}$ неизвестно:

$$(S/V)^{0,24} = -0,0138 \cdot (CST/1000)^2 + 0,1769 \cdot (CST/1000) + 0,2859. \quad (2)$$

Это означает, что, например, при использовании источника нейтрально-белого света (при высокой КЦТ и сильном сигнале колбочек S -типа) наблюдается более высокий уровень цветового предпочтения, чем в случае источника тепло-белого света, создающего такую же освещённость. Уравнение (1) содержит квадратичную зависимость от насыщенности цвета объекта, причём максимальное цветовое предпочтение достигается при умеренной насыщенности ($\Delta C^* = 4,2$). Насыщенность цвета объекта здесь выражается величиной ΔC^* , то есть

сдвигом воспринимаемой чистоты цвета в пространстве $CIELAB$, усреднённым по 15-ти цветным образцам шкалы качества цвета (*Color Quality Scale – CQS*) [35].

Квадратичный член в уравнении (1), содержащий $(S/V)^{0,24}$, необходим для учёта следующего эффекта: тепло-белому свету (3000 К) при высоких уровнях насыщенности соответствует более низкое цветовое предпочтение. Как следует из 4-го столбца табл. 1, метрика CP [29] включает в себя зависимость от КЦТ и освещённости, но не может быть использована применительно к более современным методам оценки цветопередачи, таким как принятый в *TM-30-15* подход [15, 36] или новый индекс точности воспроизведения цвета [16].

В соответствии с вышеизложенными соображениями, цель настоящей статьи состоит в том, чтобы описать новую метрику цветовых предпочтений (так называемую метрику $R_{p,2019}$) на основе повторного анализа и моделирования двух полученных ранее наборов субъективных (полученных психофизическими методами) результатов оценки цветовых предпочтений [3, 32]. Новый индекс цветового предпочтения $R_{p,2019}$ должен обладать следующими характеристиками:

1. $R_{p,2019}$ должен включать в себя зависимость от освещённости, КЦТ и насыщенности цвета объекта. В соответствии с ограниченностью базы экспериментальных данных, авторы не учитывают в описываемом варианте новой метрики зависимость цветовых предпочтений от формы цветовой гаммы и от Duv (Duv – расстояние от точки, соответствующей излучению источника белого света, до ли-

нии чёрного тела или линии дневного света на диаграмме цветности).

2. $R_{p,2019}$ должен основываться на следующих широко известных, новых или легко определяемых величинах: полученном при помощи векторной диаграммы цветов из *TM-30-15* показателе, характеризующем насыщенность цвета объекта (зависит от конкретного спектра источника света) R_f [16], КЦТ и E_v .

3. $R_{p,2019}$ должен иметь интуитивно понятную шкалу, адаптированную к субъективной шкале цветовых предпочтений наблюдателей, использовавшейся при получении экспериментальных данных о цветовых предпочтениях [3, 32]. На приведённой в [39] шкале были обозначены такие качественные оценки (категории), как «очень хорошо», «хорошо» и «посредственно». Следовательно, значение нового индекса $R_{p,2019}$ может быть легко определено для «хорошего» цветового предпочтения (в качестве минимального критерия приемлемости освещения), если известны спектр источника света и освещённость.

2. Данные о цветовых предпочтениях, использовавшиеся при разработке новой метрики цветовых предпочтений ($R_{p,2019}$)

Метрика цветовых предпочтений $R_{p,2019}$ основана на новом математическом анализе двух опубликованных ранее результатов субъективных оценок цветовых предпочтений, полученных в результате двух предыдущих исследований [3, 32]. В этом разделе описаны методики и обобщены результаты этих исследований [3, 32]. Оба исследования были лабораторными, проведёнными в специальном помещении с белыми стенами и белыми тканями на столах и с различными разноцветными наборами цветных объектов, включая искусственные цветы, картины, книги, цветные ткани и цветные карты *Macbeth ColourChecker*® (рис. 1). Эти наборы отражают характерные для помещений условия наблюдения при наличии цветных объектов, позволяющие оценить цветовые предпочтения независимо от конкретной области применения освещения [14].

В первом исследовании [3] многокристалльным СД генератором света (*light engine*) с красными, зелёны-

ми, синими и тепло-белыми СД освещались два набора цветных объектов (на рис. 1 в качестве примера изображён только первый набор). При этом были использованы 36 спектров белого света с четырьмя значениями КЦТ (3100, 4100, 5000 и 5600 К). Освещённость оставалась неизменной и была равна 750 лк. Каждой из КЦТ соответствовали девять различных спектров, формируемых использованным многокристальным источником света. При помощи каждого из этих девяти спектров обеспечивали девять разных уровней насыщенности цвета объекта. Это означает, что использовавшиеся разноспектральные излучения делали цвета окрашенных объектов более или менее насыщенными. Наблюдатели оценивали свои цветовые предпочтения по впечатлению от всех цветных объектов одновременно. «Цветовое предпочтение» было определено для наблюдателей как «субъективная оценка того, насколько наблюдателю нравится цветовой облик всех цветных объектов в целом при освещении их используемым источником света».

Наблюдатели оценивали свои цветовые предпочтения по интервальной шкале, на которой были обозначены разные качественные оценки (рис. 2). Неравномерность расстояния между этими качественными оценками следует из полученных ранее результатов [39]. В [3, 32] наблюдатели смогли успешно использовать эту интервальную шкалу. Качественные оценки были положены в основу принятия решений и помогли наблюдателям отметить на шкале свой выбор [39]. Наблюдателям было дано указание поставить свою оценку в любом месте интервальной шкалы, а не только отнести свою оценку к какой-то качественной категории (и они делали это осознанно). Качественная оценка «хорошо» со значением 79,6 играет важную роль в проектировании освещения как общий критерий приемлемости осветительной установки [29] с точки зрения цветовых предпочтений.

Недонасыщенность или перенасыщенность цветов цветных объектов, вызванная используемым источником света, характеризовалась значением насыщенности цвета (обозначается как ΔC^*), усреднённым по 15-ти цветным образцам *QOS* [35] *VS1-VS15*, формирующим набор из пятнадцати различных однотипных цветных

образцов, когда воспринимаемая чистота цвета этих образцов при освещении их используемым источником света сравнивалась с воспринимаемой чистотой их цвета при освещении образцовым источником света. Рассмотрение графика зависимости усреднённых оценок цветовых предпочтений от ΔC^* позволило выявить следующие тенденции: нейтрально-белый (4100 К) и холодно-белый (5000 и 5600 К) свет привели к более высоким субъективным оценкам цветового предпочтения, чем тепло-белый (3100 К) свет (рис. 3) [3].

На рис. 3 также видно, что значение цветового предпочтения достигает максимума при умеренной насы-

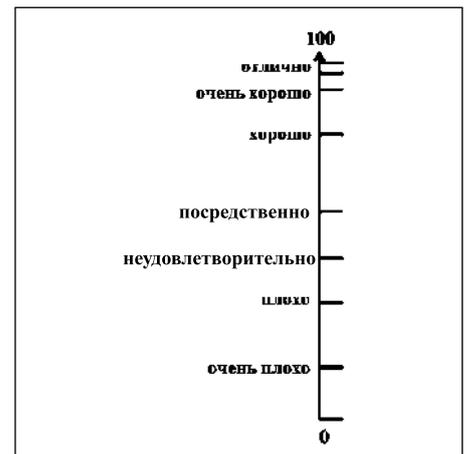


Рис. 3. Полученные в первом исследовании [3] зависимости усреднённой оценки цветовых предпочтений наблюдателей от уровня насыщенности цвета (ΔC^*) и КЦТ при фиксированном значении освещённости 750 лк

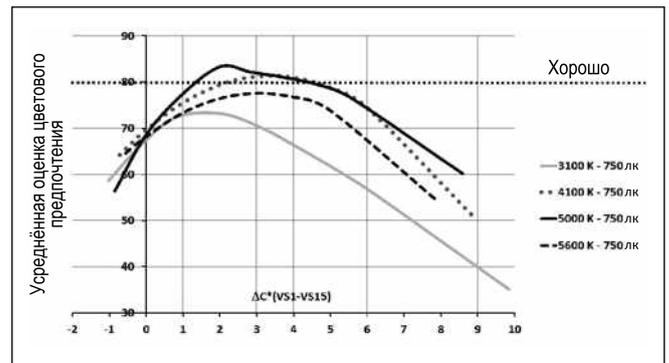
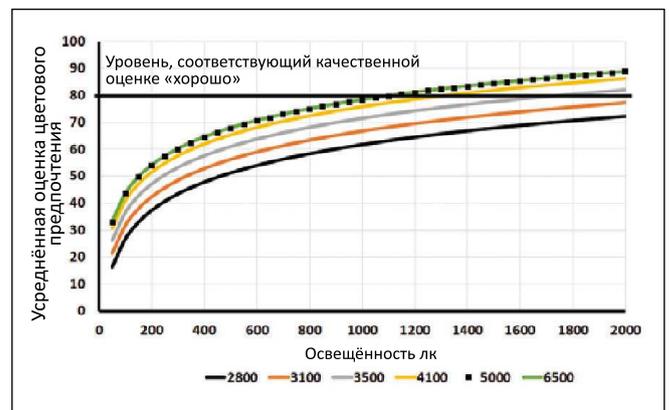


Рис. 4. Полученные во втором исследовании [32] зависимости усреднённой оценки цветовых предпочтений наблюдателей от освещённости и КЦТ при фиксированном уровне насыщенности цвета $\Delta C^* = 4,2$ (уровень максимального цветового предпочтения). (Воспроизводится с разрешения журнала *Lighting Research and Technology*)



образцов, когда воспринимаемая чистота цвета этих образцов при освещении их используемым источником света сравнивалась с воспринимаемой чистотой их цвета при освещении образцовым источником света. Рассмотрение графика зависимости усреднённых оценок цветовых предпочтений от ΔC^* позволило выявить следующие тенденции: нейтрально-белый (4100 К) и холодно-белый (5000 и 5600 К) свет привели к более высоким субъективным оценкам цветового предпочтения, чем тепло-белый (3100 К) свет (рис. 3) [3].

На рис. 3 также видно, что значение цветового предпочтения достиг

максимума при умеренной насыщенности цвета объекта. Расположение этого максимального цветового предпочтения (в терминах ΔC^*) зависит от КЦТ, поскольку более высокие КЦТ требуют большей насыщенности цвета объекта. При 3100 К средние значения цветовых предпочтений наблюдателей всегда ниже «хороших» (см. рис. 3), поскольку при этой КЦТ уровень освещённости 750 лк слишком низок для наблюдателей, так что их оценки цветовых предпочтений всегда были ниже уровня «хорошо».

Во втором исследовании [32] наблюдатели оценивали цветовые предпочтения в случае цветных объектов, лежащих на на столе (рис. 1, справа) и освещаемых 36 различными источ-

Таблица 2

Оптимальные значения входящих в уравнение (5) параметров a_i, b_i, c_i и e_i ($i = 1, 2, 3$), полученные подстановкой в уравнение (3) усреднённых субъективных оценок цветового предпочтения, произведённых применительно к 58-ми источникам света в [3, 32]

i	a_i	b_i	c_i	d_i	e_i
1	$-1,074 \cdot 10^{-6}$	0,008406	-0,01883	0,000	-31,68
2	$-4,603 \cdot 10^{-6}$	0,04249	-0,4564	$1,02 \cdot 10^4$	-63,92
3	$-3,726 \cdot 10^{-6}$	0,03519	11,37	-51,6	-143,5

никами света, при всех 36 возможных комбинациях трёх уровней насыщенности цвета объекта (низкого, с ΔC^* от $-0,1$ до $1,0$; среднего, с ΔC^* от $1,7$ до $4,4$; и высокого, с ΔC^* от $10,7$ до $12,2$), трёх КЦТ (3000, 4100 и 5600 К) и четырёх уровней освещённости (200, 500, 1000 и 1800 лк). Наблюдатели оценивали свои цветовые предпочтения, используя приведённую выше шкалу оценок (рис. 2). Усреднённые оценки цветовых предпочтений в этом втором исследовании монотонно увеличивались по мере увеличения освещённости. Для описания зависимости цветовых предпочтений от освещённости была предложена логарифмическая функция [29] (см. первый член уравнения (1) и рис. 4).

Как видно на рис. 4, усреднённые субъективные оценки цветовых предпочтений увеличиваются с возрастанием КЦТ. Следует отметить, что при всех КЦТ и всех уровнях освещённости максимумы цветовых предпочтений обычно имеют место при $\Delta C^* = 4,2$ (средний уровень насыщенности).

3. Новая метрика цветовых предпочтений ($R_{p, 2019}$): описание, область применимости, сравнение с метрикой CP и подтверждение достоверности

В этом разделе приведены уравнения, описывающие новую метрику цветовых предпочтений ($R_{p, 2019}$). Основное из этих уравнений имеет вид:

$$R_{p, 2019} = 0,70 \cdot R_f + p_1 \times \Delta C_i^2 + p_2 \cdot \Delta C_i + p_3, \quad (3)$$

где R_f – индекс точности воспроизведения цвета МКО 2017 г. (CIE2017 Colour Fidelity Index) [16], ΔC_i – так называемая полная насыщенность

цвета, описываемая уравнением (4), а p_1, p_2 и p_3 – параметры модели, которые зависят от КЦТ и освещённости (см. уравнение (5)):

$$\Delta C_i = \sum_{i=1}^{16} \frac{R_{cs, hi}}{100}, \quad (4)$$

где выраженные в % значения $R_{cs, hi}$, $i = 1-16$, соответствуют «чисто радикальной разнице между векторами, соответствующими рассматриваемому и образцовому состояниям каждого из 16-ти бинов цветовых тонов (*hue bin*)» на векторной диаграмме цветов из TM-30-15 [20]. Понятие «бин цветового тона» может быть определено как набор цветных образцов (с однородными поверхностями), имеющих схожие цветовые тона. По кругу цветовых тонов равномерно распределены 16 тонов ($i = 1-16$): красный ($i = 1$), красновато-оранжевый ($i = 2$), оранжевый ($i = 3$), жёлтый ($i = 4$), зеленовато-жёлтый ($i = 5$), желтовато-зелёный ($i = 6$), зелёный ($i = 7$), синева-то-зелёный ($i = 8$), цианово-зелёный ($i = 9$), циановый (*cyan*) ($i = 10$), синева-то-циановый ($i = 11$), синий ($i = 12$), синева-то-фиолетовый ($i = 13$), фиолетовый ($i = 14$), пурпурно-фиолетовый ($i = 15$), пурпурный ($i = 16$). Например, бин красного цветового тона ($i = 1$) содержит цветные образцы разных красных тонов. Применительно к векторной диаграмме цветов, графические расчёты можно выполнять при помощи TM-30 Calculation Tools. Сумма значений $R_{cs, hi}$ в уравнении (4) характеризует общее насыщающее или ненасыщающее воздействие источника света на освещаемые цветные объекты в целом.

Уравнение (5) описывает зависимость входящих в уравнение (3) параметров модели p_i ($i = 1-3$) от коррелированной цветовой температуры CCT и освещённости E_v :

$$p_i = a_i \cdot CCT^2 + b_i \cdot CCT + c_i \cdot \ln(E_v + d_i) + e_i \quad (5)$$

Оптимальные значения входящих в уравнение (5) параметров a_i, b_i, c_i и e_i ($i = 1, 2, 3$), которые приведены в табл. 2, были получены следующим образом:

1. Из 72-х ($36 + 36$) источников света, использовавшихся в [3, 32], которые были описаны в разделе 2, были рассмотрены только те источники света, которым соответствовали ΔC_i от $-0,4$ до $1,2$. Причина заключается в том, что оценки цветового предпочтения при использовании входящих в этот набор источников света с $\Delta C^* > 6,1$ оказались не лучше, чем «посредственно». Такие источники света не должны использоваться во внутреннем освещении. Поэтому авторы решили не учитывать эти источники света при аппроксимации. Так что из результатов первого [3] и второго [32] исследований были исключены, соответственно, два и двенадцать источников света.

2. Значения R_f и $R_{cs, hi}/100$ были рассчитаны для оставшихся 58-ми источников света (создаваемые ими освещённости и их КЦТ были известны).

3. Формулы (4) и (5) были подставлены в уравнение (3).

4. Сумма квадратов разностей между 58-ю усреднёнными субъективными оценками цветовых предпочтений [3, 32] и $R_{p, 2019}$ была минимизирована.

В соответствии с приведённым выше 4-м условием, числовая шкала новой метрики цветовых предпочтений $R_{p, 2019}$ эквивалентна визуальной шкале с отмеченными на ней качественными оценками (рис. 2). $R_{p, 2019} \geq 79,6$ должно быть достигнуто при проектировании освещения хотя бы для обеспечения «хорошего» цветового предпочтения в освещённой сцене (см. подпись к рис. 2, в которой указаны числовые значения, соответствующие различным качественным оценкам цветовых предпочтений).

Что касается точности определения приведённых в табл. 2 значений параметров, то среднее абсолютное значение разности между $R_{p, 2019}$ и усреднённым индексом цветового предпочтения наблюдателей в случае 58-ми источников света оказалось равным $2,0$ (среднеквадратичное отклонение = $1,9$; минимальное значение = $0,1$; максимальное значение = $0,1$).

ние = 7,2). Эта средняя точность аппроксимации (2,0 балла по оценочной шкале на рис. 2) невелика по сравнению с расстоянием между соседними качественными оценками (26,7 между «посредственно» и «хорошо» и 12,0 между «хорошо» и «очень хорошо»). Коэффициент корреляции Пирсона между 58-ю усреднёнными оценками цветовых предпочтений и соответствующими значениями $R_{p,2019}$ составил $r = 0,97$. При разработке новой метрики авторами также рассматривались математически менее сложные варианты, но оказалось, что для достижения такой же точности аппроксимации потребуется более высокий уровень сложности. Для сравнения, коэффициент корреляции Пирсона между 58-ю средними оценками цветовых предпочтений и соответствующими значениями CP (уравнение (1)) равнялся $r = 0,75$. Различие между этими двумя коэффициентами корреляции (0,97 и 0,75) было статистически значимой ($p < 0,001$).

Что касается области применимости приведённых в табл. 2 параметров, то в соответствии с базовым экспериментальным набором данных, эти параметры действительны для КЦТ от 3000 до 5600 лк, освещённостей от 200 до 1800 лк и ΔC_t от $-0,4$ до $1,2$. Координаты цветности, соответствующие белым точкам (*white points*²) базового набора экспериментальных данных, были расположены в пределах области $\Delta u' v' < 0,003$. В соответствии с этим ограничением, а также потому, что белые точки, которые находятся дальше от линии чёрного тела или линии дневного света, могут содержать визуально мешающие оттенки (например, зеленоватый оттенок) [24, 40], $R_{p,2019}$ не следует применять к источникам света с $\Delta u' v' \geq 0,003$.

Количественные значения $R_{p,2019}$ сравнивались с результатами расчётов CP (см. уравнение 1). На рис. 5 подобное сравнение проведено для набора из 180-ти выбранных спектров источников света. Этот набор является выборкой из 459-ти спектров, включающих в себя 58 спектров, использовавшихся для получения приведённых в табл. 2 оптимальных значений параметров [3, 32], и 401 спектр из библиотеки спектров для расчёта R_p , которая находится в открытом доступе

² См. <http://eilv.cie.co.at/term/1430>. – Прим. ред.

Рис. 5. Сравнение $R_{p,2019}$ с предыдущей метрикой (CP , уравнение 1) применительно к 180-ти спектрам источников света при четырёх значениях освещённости: 200, 500, 1000 и 1800 лк. Лучшая аппроксимация ($r^2 = 0,71$): $CP = 0,7476 \cdot R_{p,2019} + 13,965$. «Хороший» уровень цветового предпочтения $R_{p,2019} = 79,6$ указан в соответствии со шкалой, приведённой на рис. 2

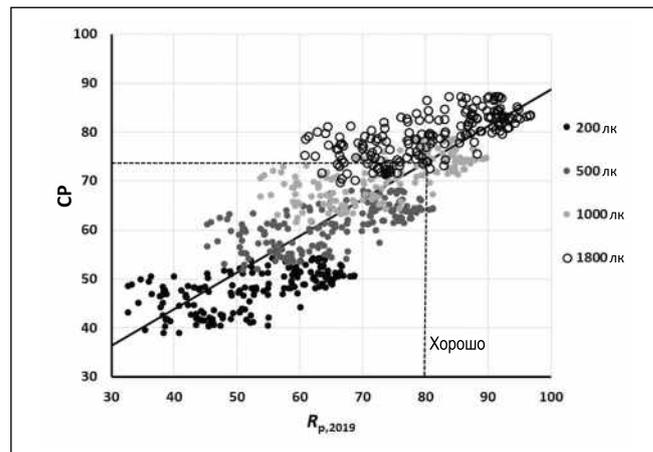


Рис. 6. Сравнение двух величин, используемых для описания насыщенности цвета объекта при освещении его конкретным источником света: ΔC_t (входит в уравнение (3) для расчёта $R_{p,2019}$) и ΔC^* (входит в уравнение (1) для расчёта CP). Аппроксимация: $\Delta C^* = 4,8645 \cdot \Delta C_t + 0,0434$ ($r^2 = 0,893$)

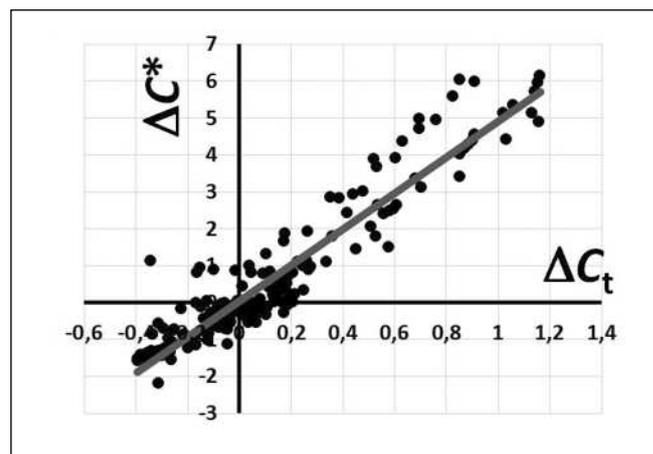
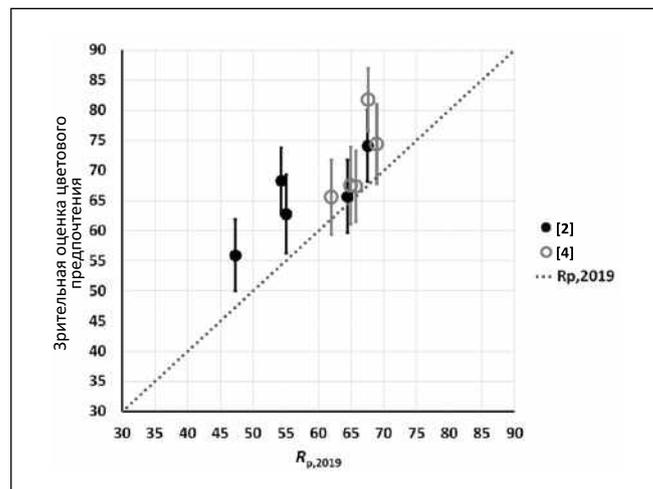


Рис. 7. Сравнение значений $R_{p,2019}$ с усреднёнными субъективными оценками цветового предпочтения (с 95 % доверительными интервалами, отражающими разброс сделанных наблюдателями оценок), полученными в [2] и [4]. Два источника света были исключены из [4] из-за $\Delta u' v' \geq 0,003$



в публикации МКО [16]. Выборка этих 180-ти спектров из 459-ти была произведена следующим образом:

1. Спектры с $R_p < 70$ были исключены (они не используются во внутреннем освещении).

2. Использовались только спектры в области применимости $R_{p,2019}$. Это означает, что авторы рассматривали только спектры с КЦТ от 3000 до 5600 К и ΔC_t от $-0,4$ до $1,2$. Значения $R_{p,2019}$ и CP были рассчитаны для

четырёх значений освещённости: 200, 500, 1000 и 1800 лк.

Как видно на рис. 5, связь между предлагаемой метрикой $R_{p,2019}$ (см. уравнение (3)) и предыдущей метрикой CP [32] (см. уравнение (1)) может быть аппроксимирована линейной функцией ($r^2 = 0,71$, см. подпись к рис. 5). Поскольку базовые для обеих метрик наборы субъективных цветовых предпочтений были получены с использованием одной и той же

субъективной шкалы оценок (рис. 2), то можно сравнить абсолютные значения результатов, полученных применительно к этим двум метрикам. Как правило, результаты, полученные для одного и того же спектра источника света при одном и том же значении освещённости с использованием метрики CP , оказываются на примерно шесть единиц ниже оценок цветового предпочтения (см. рис. 2). То есть тогда, когда, например, при отмеченных на рис. 5 условиях освещения согласно $R_{p,2019}$ уровень цветовых предпочтений оказывается «хорошим» (79,6, см. подпись к рис. 2), значение CP составляет только 73,5, что можно считать «хорошим-посредственным» уровнем цветовых предпочтений.

Причины этой разности оценок, а также разброса отображающих полученные данные точек, могут быть следующими:

1. Метрика CP основана только на втором наборе данных [32], в то время как в $R_{p,2019}$ учтены и результаты первого исследования [3] (см. раздел 2).

2. Метрики основаны на разных цветовых пространствах и цветных образцах ($CIELAB$ и 15 цветных образцов CQS для метрики CP и $SAM02-UCS$ с 16-ю бинами цветовых тонов стандарта $TM-30-15$ для $R_{p,2019}$). Сравнение этих метрик для большого набора спектров источников света проведено на рис. 5. Для дальнейшего анализа интересно сравнить ΔC_t (входящего в уравнение (3) для расчёта $R_{p,2019}$) и ΔC^* (входящего в уравнение (1) для расчёта CP) применительно к описанию насыщенности цвета объекта при освещении его конкретным источником света (рис. 6).

Как видно на рис. 6, при заданном значении ΔC^* максимальный разброс соответствующих ему значений ΔC_t может оказаться равным 0,7 (с одинаковыми колебаниями в направлениях «ненасыщающий» и «насыщающий»). Это может вызвать большие расхождения в оценке цветового предпочтения, если рассматриваемые метрики применяются к случайному источнику света. Этот вывод подтверждает важность использования метода $TM-30-15$ и индекса точности воспроизведения цвета МКО R_f [16] при проектировании освещения.

Для проверки результаты расчётов $R_{p,2019}$ сравнивались со средними оценками цветовых предпочтений, полученными применительно к удов-

летворяющей следующим критериям выборки из результатов предыдущих исследований:

1. Использование той же шкалы оценок, что и в настоящей статье (см. рис. 2).

2. Использование сочетаний многоцветных объектов (аналогично рис. 1), а не только объектов определённых тонов (например, красных);

3. Использование источников света из области применимости $R_{p,2019}$.

Согласно этим критериям, авторами были выбраны два исследования [2, 4]. В [2] были использованы пять источников света (СД с люминофором, компактные люминесцентные лампы и галогенные лампы накаливания) при фиксированной освещённости 470 лк и КЦТ от 2300 до 4100 К, тогда как в [4] были использованы семь многокристалльных СД источников света при фиксированных значениях КЦТ (3220 К) и освещённости (550 лк). Два источника света из [4], которые оказались вне области применимости $R_{p,2019}$ (так как у них $\Delta u'v' \geq 0,003$), не рассматривались. Результат проведённого сравнения показан на рис. 7.

Как видно на рис. 7, $R_{p,2019}$ позволяет прогнозировать изменение усреднённых субъективных оценок цветового предпочтения. Коэффициент корреляции Пирсона между $R_{p,2019}$ и десятью приведёнными на рис. 7 усреднёнными субъективными оценками цветовых предпочтений составил $r = 0,78$. Среднее расхождение между усреднённой субъективной оценкой цветового предпочтения и значением $R_{p,2019}$ равнялось 7 (среднеквадратичное отклонение равно 4) по шкале оценок, приведённой на рис. 2. Это расхождение было значительным в случае пяти источников света (см. те доверительные интервалы усреднённых субъективных оценок, которые на рис. 7 не пересекаются с серой пунктирной линией значений $R_{p,2019}$). Эти расхождения не приводили к переходу от одной из двух смежных качественных оценок к другой, например, от «хорошо» к «посредственно» (см. табл. 3).

Следует отметить, что принятый в настоящей статье подход к прогнозированию субъективных оценок цветовых предпочтений с привязкой их к приведённым на рис. 2 качественным оценкам отличается от подходов, принятых в других исследованиях (например, [13, 33, 34]) и осно-

ванных на анализе корреляции между метрикой и субъективной оценкой по произвольной шкале. В настоящей статье авторы рассматривают не только корреляцию, но и абсолютные различия между оценками, сделанными с использованием соответствующих шкал (см. табл. 3). Возможные причины абсолютных различий включают в себя несовпадение полей наблюдения, погодных условий, времени дня или времени года. Причиной различий могут быть и разные условия наблюдения (кабина в [4] вместо помещения в [2]), а также ограниченный диапазон значений освещённости (470–550 лк), рассматривавшихся в [2, 4] без сравнения их с более высокими значениями освещённости. Следовательно, необходимо провести в реальном помещении дополнительные контрольные исследования с систематическим варьированием всех трёх независимых переменных (освещённость, КЦТ и насыщенность цвета объекта) и использованием большего количества данных.

4. Применение $R_{p,2019}$ при проектировании освещения

Если спектр исследуемого источника света, который будет применяться в осветительной установке, известен, то можно рассчитать значения КЦТ, R_f и ΔC_t (см. уравнение (4)). Можно задать несколько значений освещённости на рабочей плоскости (например, на горизонтальной поверхности стола в помещении), на которой можно расположить цветные объекты. Эти цветные объекты могут освещаться светильником с рассматриваемым источником света. На рис. 8 показана зависимость $R_{p,2019}$ (см. уравнения (3) – (5)) от освещённости E_v для четырёх источников света разного типа, спектры которых приведены на рис. 9, а соответствующие значения КЦТ, R_f и ΔC_t приведены в табл. 4. На рис. 8 и в табл. 4 отмечены значения освещённости, при которых $R_{p,2019}$ достигает «очень хорошего» и «хорошего» уровней цветового предпочтения применительно к этим четырём источникам света разного типа. Хотя оценка «посредственно» при проектировании освещения не рассматривается, она всё же включена в рис. 8 для лучшего понимания.

Как следует из рис. 8 и табл. 4, в случае 2-го спектра (СД типа RGB)

Проверка достоверности численных оценок $R_{p,2019}$ на основе усреднённых субъективных оценок цветового предпочтения, полученных в [2] и [4] (см. также рис. 7)

Исследование	Интервальная шкала (см. рис. 2)			Качественная оценка (см. рис. 2)	
	Субъективная оценка	$R_{p,2019}$	Различие	Субъективная оценка	$R_{p,2019}$
[2]	68	54	14	хорошо-посредственно	посредственно
[2]	63	55	8	посредственно-хорошо	посредственно
[2]	66	64	1	посредственно-хорошо	посредственно-хорошо
[2]	74	68	7	хорошо-посредственно	хорошо-посредственно
[2]	56	47	9	посредственно	посредственно -посредственно
[4]	66	62	4	хорошо-посредственно	посредственно-хорошо
[4]	67	66	2	хорошо-посредственно	хорошо-посредственно
[4]	67	65	3	хорошо-посредственно	хорошо-посредственно
[4]	82	68	14	хорошо	хорошо-посредственно
[4]	74	69	5	хорошо-посредственно	хорошо-посредственно

в области применимости $R_{p,2019}$ (200–1800 лк) невозможно достичь ни «хорошего», ни «очень хорошего» уровня цветового предпочтения. Причина в том, что этот спектр приводит к уменьшению насыщенности цвета объекта ($\Delta C_i < 0$) и имеет низкое значение R_f (77). Для 1-го спектра (СД типа $RGBW$ с $R_f = 90$ и умеренным перенасыщением цвета объекта $\Delta C_i = 0,61$) справедливо обратное утверждение: если этот источник света используется для освещения цветных объектов, то «хороший» уровень цветового предпочтения может быть получен при освещённости 440 лк, в то время как «очень хороший» уровень достигается при 1170 лк. Используя 3-й или 4-й спектр, можно в соответствии с их колориметрическими свойствами достичь только «хорошего» уровня цветового предпочтения при, соответственно, 1650 и 890 лк.

Рис. 8 иллюстрирует процесс достижения высокого уровня цветового предпочтения при проектировании освещения. Светильники, содержащие конкретный источник света, должны быть включены в проект освещения помещения (а затем и установлены) для обеспечения такого уровня освещённости на рабочей плоскости с расположенными на ней цветными объектами ($P_{el, crit}$), который, по меньшей мере, соответствовал бы качественной оценке «хорошо». После завершения проектирования осветительной установки будет известна электрическая

мощность, необходимая для обеспечения этого уровня освещённости, и можно будет рассчитать значение эффективности для этого цветового предпочтения:

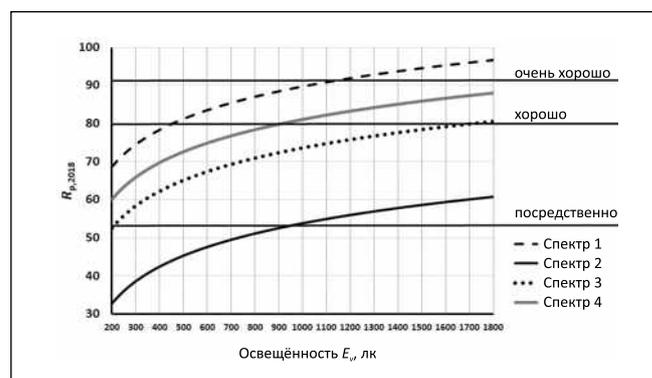
$$\eta_{p,2019} = \frac{R_{p,2019, crit.}}{P_{el, crit.}} = \frac{79.6}{P_{el, crit.}} \text{ (Вт}^{-1}\text{)}.$$

Эти значения можно рассчитать для всех вариантов осветительной установки применительно к разным источникам света. Таким образом, можно сравнить различные смоделированные осветительные установки и выбрать из них наиболее эффективную. Недавно была предложена новая метрика эффективности использования электрической энергии [41], но эта метрика предназначена для источников света, а не для осветительных установок и не для оценки цветового предпочтения.

В табл. 5 проведено сравнение определённых в соответствии с индексом $R_{p,2019}$ уровней цветового предпочтения, которые были получены для освещённостей 500 и 1200 применительно к четырём источникам света, спектры которых приведены на рис. 9. Как следует из табл. 5, если освещённость увеличивается от 500 до 1200 лк, то цветовое предпочтение, определяемое в соответствии с $R_{p,2019}$, смещается по шкале цветового предпочтения (рис. 2) на 10–11 пунктов вверх. В случае 1-го источника света это приращение соответствует переходу из категории «хорошо» в категорию «очень хорошо», а в случае 2-го источника света – из категории «плохо» в категорию «посредственно». Для 3-го и 4-го источников света такого существенного сдвига оценок не наблюдается.

Также интересно построить зависимость $R_{p,2019}$ от КЦТ. На рис. 10 при-

Рис. 8. Применение $R_{p,2019}$ при проектировании внутреннего освещения: зависимость $R_{p,2019}$ от освещённости E_v для четырёх источников света (см. рис. 9 и табл. 4)



Применение $R_{p,2019}$ при проектировании внутреннего освещения: значения освещённости, при которых $R_{p,2019}$ достигает уровней цветового предпочтения «очень хорошо» и «хорошо» для четырёх разных спектров, показанных на рис. 8

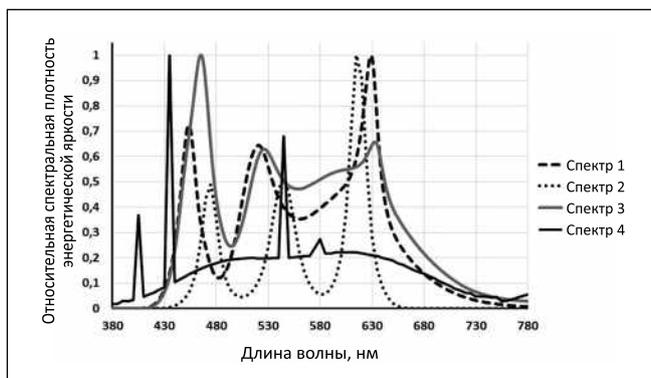
Спектр					Освещённость, лк, соответствующая качественной оценке:	
№	Источник света	R_f	КЦТ, К	ΔC_t	«хорошо», $R_{p,2019} = 79,6$	«очень хорошо», $R_{p,2019} = 91,6$
1	СД типа RGBW	90	3993	0,61	440	1170
2	СД типа RGB	77	3243	-0,34	*	*
3	СД типа RGBW	88	4840	-0,17	1650	*
4	Люминесцентная лампа	89	5091	0,05	890	*

* Уровня «хорошо» в пределах области применения $R_{p,2019}$ (200–1800 лк) достичь невозможно.

Уровни цветового предпочтения $R_{p,2019}$, полученные при 500 и 1200 лк для четырёх источников света, спектры излучения которых приведены на рис. 8

Спектр				$E_v = 500$ лк		$E_v = 1200$ лк		500 лк →1200 лк
№	R_f	КЦТ, К	ΔC_t	$R_{p,2019}$	Качественная оценка для $R_{p,2019}$	$R_{p,2019}$	Качественная оценка для $R_{p,2019}$	$R_{p,2019}$
1	90	3993	0.61	81	хорошо	92	очень хорошо	11
2	77	3243	-0.34	45	посредственно	56	умеренно	11
3	88	4840	-0.17	65	посредственно-хорошо	76	хорошо	11
4	89	5091	0.05	73	хорошо-посредственно	83	хорошо	10

Рис. 9. Относительная спектральная плотность энергетической яркости четырёх источников света из рис. 8 (характеристики этих источников света приведены в табл. 4): 1 – СД типа RGBW; 2 – СД типа RGB; 3 – СД типа RGBW; 4 – люминесцентная лампа



ведён расчётный пример, полученный с использованием уравнений (3) и (5) в пределах области применения $R_{p,2019}$ (3000–5600 К) независимо от какого-либо конкретного спектра источника света для $R_f = 84$, $E_v = 500$ лк и различных значений ΔC_t в качестве параметров. Были использованы следующие значения ΔC_t : 1,2; 0,9435 (что при $R_f = 84$ и $E_v = 500$ лк соответствует максимальному значению $R_{p,2019}$); 0,8; 0,4; 0,0 и -0,4 (это значение ΔC_t соответствует уменьшению насыщенности цвета).

Как видно на рис. 10, согласно результатам расчётов $R_{p,2019}$, наилуч-

ший уровень цветового предпочтения достигается в интервале от 4500 до 4800 К (нейтрально-белый и холодно-белый свет соответственно), что согласуется с базовым набором экспериментальных данных о цветовом предпочтении. Величины абсолютных максимумов зависимостей $R_{p,2019}$ от КЦТ зависят от уровня насыщенности цвета ΔC_t . Поскольку $R_{p,2019}$ был сформирован на основе результатов исследований установок искусственного освещения, проведённых с использованием цветных объектов с белыми стенами и белыми тканя-

ми (см. раздел 2), то можно ожидать, что ход приведённых на рис. 10 зависимостей $R_{p,2019}$ от КЦТ можно будет использовать для прогнозирования цветового предпочтения для различных ситуаций и условий работы, включая офисы, школы, выставки, конференц-залы, аудитории, помещения для завтраков в отелях и салоны в общественном транспорте. Для областей применения, которые требуют создания расслабленной атмосферы (например, романтические вечерние мероприятия, обеды, умственная творческая деятельность), более подходящими могут быть осветительные установки с более низкими КЦТ и более низкими уровнями освещённости. В последнем случае обеспечение высокого уровня цветового предпочтения не является (основной) целью при проектировании освещения.

5. Обсуждение

Новая метрика цветовых предпочтений ($R_{p,2019}$) обобщает экспериментальные данные о зависимости цветовых предпочтений от КЦТ, насыщенности цвета объекта и освещённости.

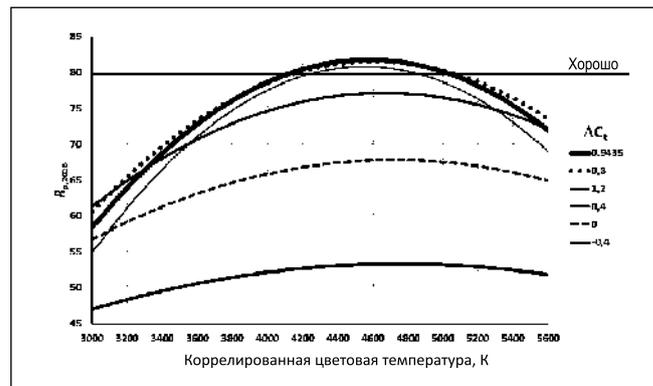
В метрику встроена семантическая интерпретация её числовой шкалы, связанная с качественной оценкой цветовых предпочтений («очень хорошо», «хорошо», «посредственно», см. рис. 2). Метрика позволяет определить значения освещённости, необходимые для достижения «хорошего» или «очень хорошего» уровня цветового предпочтения в случае конкретной осветительной установки (см. рис. 8), за исключением спектров с плохим качеством цветопередачи (например, спектр № 2 на рис. 9), в случае которых нельзя достичь «хорошего» уровня цветового предпочтения.

Помимо вышеуказанных достоинств, новая метрика имеет и следующие ограничения. Область применимости её входных параметров ограничена: метрика не может использоваться применительно к источникам тепло-белого света с КЦТ < 3000 К и к источникам холодно-белого света с КЦТ > 5600 К. Уровень освещённости также ограничен диапазоном от 200 до 1800 лк, который, однако, охватывает типичные освещённости, характерные для современного общего внутреннего освещения.

Что касается уровней насыщенности цвета, то источники света с $\Delta C_t > 1,2$ обычно приводят к перенасыщенности цветов цветных объектов, и при их использовании цветовые предпочтения обычно оцениваются как «посредственно» или ниже. Такие источники света не должны применяться в освещении. При таких высоких уровнях насыщенности цвета ($\Delta C_t > 1,2$) значение цветового предпочтения, получаемое в рамках этой метрики, с увеличением ΔC_t быстро уменьшается. Соответственно, такие источники света не должны применяться для общего внутреннего освещения, хотя они могут иметь специальное применение, например, при освещении театральных сцен для обеспечения сильного эмоционального эффекта. Ещё одним ограничением является зависимость субъективных оценок цветового предпочтения от области применения освещения [14], о чём уже упоминалось в конце раздела 4.

Экспериментальные данные свидетельствуют о том, что на оценку наблюдателями цветовых предпочтений существенно влияет форма цветовой гаммы (особенно насыщенность

Рис. 10. Зависимость $R_{p,2019}$ от КЦТ при фиксированных значениях $R_f = 84$ и $E_v = 500$ лк. Расчётный пример с использованием уравнений (3) и (5) с различными значениями ΔC_t в качестве параметров. Абсолютный максимум $R_{p,2019}$ наблюдается при $\Delta C_t = 0,9435$



красного цвета) [13, 19, 20]. Насыщенность красного цвета не учитывается в рассматриваемой метрике $R_{p,2019}$ из-за ограниченности базовых наборов данных о цветовых предпочтениях [3, 32]: в этих экспериментах исследовалось влияние только КЦТ и освещённости без учёта влияния изменений насыщенности красного цвета, которое должно быть изучено в последующих исследованиях. Влияние насыщенности красного цвета особенно важно учитывать, если используются спектры излучения, специально предназначенные для обеспечения насыщенности цветов красных объектов (см. векторную диаграмму цветов на приведённом в [13] рис. 2). Для описания этого эффекта была разработана метрика *LIKE* (см. табл. 1), в которой используются следующие параметры [15]: R_f , $R_{cs, h16}$ (в качестве показателя насыщенности красного цвета; эта величина также используется в уравнении (4) настоящей статьи как одно из слагаемых при суммировании всех 16-ти значений $R_{cs, hi}$) и ψ (который представляет собой угол поворота наилучшим образом подобранного эллипса; этот эллипс аппроксимирует форму векторной диаграммы цветов *IES TM-30-15*).

При освещении совокупности цветных объектов, белый тон источника света обычно заметен на белых или нейтрально-серых поверхностях (стенах, скатертях, подоконниках, шторах, мебели), и восприятие этого белого тона влияет на определение уровня цветового предпочтения применительно к цветным объектам. Зависимость восприятия тона белого света (тепло-белый, нейтрально-белый, холодно-белый) от КЦТ и связь этого восприятия с цветовыми предпочтениями включены в метрики *CQS* [35], *CP* (уравнение (1)) и $R_{p,2019}$ (уравнения (3) – (5)). Однако было показано [25, 42,

43], что расстояние от соответствующих белому тону координат цветности до линии чёрного тела (выраженное как Duv или $\Delta u'v'$) также влияет на цветовое предпочтение. Цветности, которые находятся ниже линии чёрного тела, получали в целом более высокую оценку. Причина такого предпочтения была выявлена с помощью моделирования [26]: «источники света с цветностями ниже линии чёрного тела (то есть с отрицательными Duv) скорее получают высокую оценку в части цветовой гаммы, чем источники света, цветности которых лежат на линии чёрного тела или выше неё, сохраняя при этом высокие индексы точности воспроизведения цвета» [26]. Этот эффект не включён в новую метрику цветовых предпочтений $R_{p,2019}$, которой посвящена настоящая статья.

6. Выводы и перспективы

Подобные приведённым на рис. 8 зависимости цветового предпочтения от освещённости для разных источников света (или для разных вариантов многокристалльных СД источников света) можно использовать при проектировании, и выбрать в результате наиболее энергоэффективный источник света с «хорошим» уровнем цветового предпочтения. Если имеется только один источник света, то можно рассчитать соответствующий качественной оценке «хорошо» уровень освещённости, варьируя при этом количество светильников (с этим источником света), устанавливаемых в помещении, и высоту установки светильников над столом, на котором размещены освещаемые цветные объекты.

В соответствии с условиями наблюдения, использовавшимися при получении экспериментальных наборов данных, лежащих в основе но-

вой метрики цветовых предпочтений (нейтральная среда с белыми стенами, белыми скатертями и разнообразными цветными объектами), эта метрика должна быть применимой для служебных помещений или производственных условий. Для других областей применения, включая освещение жилых комнат или столовых в вечернее время, а также для специальных наборов цветных предметов (например, красной косметики, синих джинсов или важных хранящихся в памяти цветов, таких как цвет банана или оттенок кожи), следует применять другую метрику цветовых предпочтений.

Согласно табл. 5, равного 500 лк типичного уровня освещённости (наиболее распространённый уровень горизонтальной освещённости, требуемый стандартом для общего освещения рабочих мест [44]), часто недостаточно для обеспечения «хорошего» цветового предпочтения. В случае предъявляющих повышенные требования к световому предпочтению областей применения этот уровень освещённости должен быть увеличен (если это возможно) либо за счёт естественного освещения помещения, либо за счёт увеличения количества потребляемой светильниками электрической мощности (связанные с этим экономические соображения выходят за рамки настоящей статьи).

Контрольное исследование с использованием этой же семантически маркированной шкалы цветовых предпочтений (см. рис. 2) в настоящее время проводится в просторном экспериментальном помещении с осветительной установкой с большим количеством СД, позволяющей в более широком диапазоне, чем в предыдущих исследованиях, варьировать такие существенные параметры освещения, как освещённость, КЦТ (от 2800 до 6500 К), расстояние от координат цветности источника света до линии чёрного тела, насыщенность цвета объекта и насыщенность красного цвета. Цель этого исследования состоит в том, чтобы проверить и расширить область применимости уравнений (3) – (5) и ещё раз оптимизировать приведённые в табл. 2 параметры модели. Будет уточнено и используемое в настоящее время равное 0,70 значение весового коэффициента индекса точности воспроизведения цвета R_f .

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. P. Bodrogi, S. Brückner, T.Q. Khanh, H. Winkler, Visual Assessment of Light Source Colour Quality // Colour Research and Application.– 2013. – Vol .38. – P. 4–13.
2. T.Q. Khanh, P. Bodrogi, Q.T. Vinh, D. Stojanovic, Colour preference, naturalness, vividness and colour quality metrics – Part 1: Experiments in a real room // Lighting Research and Technology.– 2016. – Vol .49. – P. 697–713.
3. T.Q. Khanh, P. Bodrogi, Q.T. Vinh, X. Guo, T.T. Anh, «Colour preference, naturalness, vividness and colour quality metrics, Part 4: Experiments with still life arrangements at different correlated colour temperatures // Lighting Research and Technology.– 2017. – Vol .50. – P. 862–879.
4. T.Q. Khanh, P. Bodrogi, Q.T. Vinh, D. Stojanovic, Colour preference, naturalness, vividness and colour quality metrics, Part 2: Experiments in a viewing booth and analysis of the combined dataset // Lighting Research and Technology.– 2017. – Vol .49. – P. 714–726.
5. T.Q. Khanh, P. Bodrogi, X. Guo, Q.T. Vinh, S. Fischer, Colour preference, naturalness, vividness and colour quality metrics, Part 5: A colour preference experiment at 2000 lx in a real room // Lighting Research and Technology; first published online 20 October; DOI 10.1177/1477153517737133.– 2017.
6. S. Jost-Boissard, P. Vouac, P. Fontoynt, Assessing the colour quality of LED sources: Naturalness, attractiveness, colourfulness and colour difference // Lighting Res. Technol.– 2015. – Vol .47. – P. 769–794.
7. D. Durmus, W. Davis, Object colour naturalness and attractiveness with spectrally optimized illumination // Optics Express.– 2017. – Vol .25. – P. 12839–12850.
8. Y. Lin, J. He, A. Tsukitani, H. Noguchi, Colour quality evaluation of natural objects based on the Feeling of Contrast Index // Lighting Research and Technology.– 2016. – Vol .48. – P. 323–339.
9. K. A.G. Smet, P. Hanselaer, Memory and preferred colours and the colour rendition of white light sources // Lighting Research and Technology.– 2016. – Vol .48. – P. 393–411.
10. P.R. Boyce, C. Cuttle, Effect of correlated colour temperature on the perception of interiors and colour discrimination performance // Lighting Research and Technology.– 1990. – Vol .22. – P. 19–36.
11. L. Xu, M.R. Luo, M. Pointer, The development of a colour discrimination index // Lighting Research and Technology.– 2018. – Vol .50. – P. 681–700.
12. T. Esposito, K. Houser, A new measure of colour discrimination for LEDs and other light sources // Lighting Research and Technology.– 2019. – Vol .51. – P. 5–23.
13. T. Esposito, K. Houser, Models of colour quality over a wide range of spectral power distributions // Lighting Research and Technology; first published online on April 13; DOI 10.1177/1477153518765953.– 2018.

14. Y. Lin, M. Wei, K. A. G Smet, A. Tsukitani, P. Bodrogi, T.Q. Khanh, Colour preference varies with lighting application,» Lighting Research and Technology.– 2015. – Vol .49. – P. 316–332.

15. IES (Illuminating Engineering Society), IES method for evaluating light source colour rendition // IES TM-30-15.– 2015.

16. CIE (Commission Internationale de l'Éclairage), CIE2017 Colour Fidelity Index for accurate scientific use // CIE Publication 224:2017.– 2017.

17. M.S. Islam, R. Dangol, M. Hyvärinen, P. Bhusal, M. Puolakka, L. Halonen, User preferences for LED lighting in terms of light spectrum // Lighting Research and Technology.– 2013. – Vol .45. – P. 641–665.

18. R. Dangol, M.S. Islam, M. Hyvärinen, P. Bhusal, M. Puolakka, L. Halonen, User acceptance studies for LED office lighting: Preference, naturalness and colourfulness // Lighting Research and Technology.– 2015. – Vol .47. – P. 36–53.

19. M. Wei, K.W. Houser, A. David, M.R. Krames, Colour gamut size and shape influence colour preference // Lighting Research and Technology.– 2017. – Vol .49. – P. 992–1014.

20. M.P. Royer, A. Wilkerson, M. Wei, K. Houser, R. Davis, Human perceptions of colour rendition vary with average fidelity, average gamut, and gamut shape // Lighting Research and Technology.– 2017. – Vol .49. – P. 966–991.

21. M.P. Royer, A. Wilkerson, M. Wei, Human perceptions of colour rendition at different chromaticities // Lighting Research and Technology.– 2018. – Vol .50. – P. 965–994.

22. Z. Huang, Q. Liu, S. Westland, M.R. Pointer, M.R. Luo, K. Xiao, Light dominates colour preference when correlated colour temperature differs // Lighting Research and Technology.– 2018. – Vol .50. – P. 995–1012.

23. H. Li, M.R. Luo, X.Y. Liu, B.Y. Wang, H.Y. Liu, Evaluation of colour appearance in a real lit room // Lighting Research and Technology.– 2016. – Vol .48. – P. 412–432.

24. P. Bodrogi, X. Guo, D. Stojanovic, S. Fischer, T.Q. Khanh, Observer preference for perceived illumination chromaticity // Colour Research and Application, Early View.– 2018.

25. Y. Wang, M. Wei, Preference among light sources with different Duv but similar colour rendition: A pilot study // Lighting Research and Technology.– 2018. – Vol .50. – P. 1013–1023.

26. M. Wei, K.W. Houser, What Is the Cause of Apparent Preference for Sources with Chromaticity below the Blackbody Locus? // LEUKOS.– 2016. – Vol .12. – P. 95–99.

27. M. Wei, W. Bao, H.P. Huang, Consideration of Light Level in Specifying Light Source Colour Rendition // LEUKOS, published online on 11 May; DOI 10.1080/15502724.2018.1448992.– 2018.

28. M. Wei, Maintaining Colour Preference under Different Light Levels, // presented at the 15th China International Forum on Solid State Lighting, Shenzhen, China.– 23–25 Oct. 2018.

29. T.Q. Khanh, P. Bodrogi, X. Guo, P.Q. Anh Ph.D, Towards a user preference model for interior lighting Part 2: Experimental results and modelling // Lighting Research and Technology; published online on December 13; DOI 10.1177/1477153518816474.– 2018.

30. H.W. Bodmann, G. Sollner, E. Voit, Evaluation of lighting level with various kinds of light // in: Proceedings of the CIE19th Session (CIE, 1963).

31. H.W. Bodmann, Quality of interior lighting based on luminance // Transactions of the Illuminating Engineering Society.– 1967. – Vol .32. – P. 22–40.

32. T.Q. Khanh, P. Bodrogi, X. Guo, P.Q. Anh Ph.D, Towards a user preference model for interior lighting Part 1: Concept of the user preference model and experimental method,» Lighting Research and Technology; published online on December 13; DOI 10.1177/1477153518816469 (2018).

33. K. Smet, W.R. Ryckaert, M.R. Pointer, G. Deconinck, P. Hanselaer, Correlation between colour quality metric predictions and visual appreciation of light sources // Optics Express.– 2011. – Vol .19. – P. 8151–8166.

34. K.W. Houser, M. Wei, A. David, M.R. Krames, X.S. Shen, Review of measures for light-source colour rendition and considerations for a two-measure system for characterizing colour rendition // Optics Express.– 2013. – Vol .21. – P. 10393–10411.

35. W. Davis, Y. Ohno, Colour quality scale // Optical Engineering.– 2010. – Vol .49. – P. 033602.

36. A. David, P.T. Fini, K.W. Houser, L. Whitehead, Development of the IES method for evaluating the colour rendition of light sources // Optics Express.– 2015. – Vol .23. – P. 15888–15906.

37. F. Ebner, M.D. Fairchild, Development and testing of a colour space (IPT) with improved hue uniformity // in: Proceedings of the IS&T 6th Colour Imaging Conference.– 1998.

38. S.A. Fotios, G.J. Levermore, Chromatic effect on apparent brightness in interior spaces, II: SWS lumens model // Lighting Research and Technology.– 1998. – Vol .30. – P. 103–106.

39. P. Bodrogi, S. Brückner, N. Krause, T.Q. Khanh, Semantic interpretation of colour differences and colour-rendering indices // Colour Research and Application.– 2014. – Vol .39. – P. 252–262.

40. M.S. Rea, J.P. Freyssinier, White lighting // Colour Research and Application.– 2013. – Vol .38. – P. 82–92.

41. Q.T. Vinh, P. Bodrogi, T.Q. Khanh, Preliminary measure for the characterization of the usefulness of light sources // Optics Express.– 2018. – Vol .26. – P. 14538–14551.

42. E.E. Dikel, G.J. Burns, J.A. Veitch, S. Mancini, G.R. Newsham, Preferred chromaticity of colour-tunable LED lighting // LEUKOS.– 2014. – Vol .10. – P. 101–115.

43. Y. Ohno, M. Fein, Vision experiment on acceptable and preferred white light chromaticity for lighting // in: Proceedings of CIE2014

Lighting Quality and Energy Efficiency, CIE.– 2014.

44. DIN (German Industry Standard), DIN EN12464–1, Lighting of work places – Part 1: Indoor work places, DIN.– 2011.



Куанг Тринь Винь (Quang Trinh Vinh), Ph.D. Научный сотрудник Дармштадтского технического университета. Область научных интересов: светотехнические

аспекты СД освещения и автоматизации



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

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



Тран Туу Ань (Tran Thuu Anh), Ph. D. доцент Вьетнамского национального университета в Ханое. Область научных интересов: вопросы культуры, включая технокультуру и поведение покупателей



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

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

«Самая узкая медицинская лампа» 2019 года по версии IES

Североамериканское светотехническое общество (IES) в своём ежегодном отчёте («PROGRESS REPORT ACCEPTED PRODUCTS») публикует информацию об осветительных приборах, которые могут быть названы уникальными инновационными достижениями для светотехнической промышленности. В отчёте за 2019 г. одним из таких осветительных приборов был назван светильник «Lenga» компании «Visa Lighting» – двухсекционный щелевой светильник для освещения комнаты пациента.



«Lenga» был разработан, чтобы обеспечить многофункциональное освещение комнаты пациента, занимая при этом как можно меньше места. Дополнительные осветительные приборы, применяемые в медицинских учреждениях, должны обеспечивать достаточную освещённость для работы персонала – ухода за больными, проведения осмотров и др. Тем не менее, пространство потолка и стен палаты весьма ограничено из-за необходимости размещения потолочного и настенного медицинского оборудования, систем вызова персонала, карнизов, а также проводки и вентиляционных систем. Для решения этой проблемы, компания «Visa Lighting» спроектировала светильник «Lenga» как можно более узким – его габариты не превышают 83 мм в ширину и 102 мм в глубину.

Прибор оснащён оптикой для двух режимов: «Ambient» и «Exam»: при первом используются обе стороны каждого светильника, а при втором светильник непосредственно освещает кровать пациента без затенения. В устройстве используются СД или настраиваемые ИС для циркадного освещения.

finance.yahoo.com
15.08.2019

Сцена в свете софитов. Парадоксы профессии: художник, свет, театр

Е.А. ЗАЕВА-БУРДОНСКАЯ¹, Ю.В. НАЗАРОВ²

¹МГХПА им. С.Г. Строганова, ²НОУ «Национальный институт дизайна», Москва
E-mail: lenartt@gmail.com

*Свет – это мировоззрение.
Ф. Феллини*

Аннотация

Художник по свету сегодня становится одной из ведущих фигур в формировании концепции театральной сценографии. Светотехнологии с огромным потенциалом световых, цветовых и графических возможностей позволили профессии занять лидирующие позиции в пространстве любого объекта. Сегодняшняя ориентация всей визуальной культуры на зрелищность вкупе с авангардными разработками художников театра начала XX века сформировали основные художественные тенденции данного вида искусств. Сегодня модернистские находки прошлого дополнились инновационными мультимедийными технологиями. Зрелищные приёмы, отрабатываемые на эстрадных «шоу», серьёзно повлияли на отношение людей к сценическому пространству. Они сделали театральные постановки сверхдинамичными за счёт использования световых и медиа эффектов, существенно расширили палитру изобразительных и выразительных возможностей художника.

Новая парадигма света как активного инструмента формообразования позволила моделировать пространство с помощью светотехнологий. Свет на сцене стал формой, наделённой огромной эмоциональной силой, неразрывно связанной с драматургией постановки. При этом цель художника по свету в содружестве с художниками-постановщиками и художниками по костюму должна неизменно подводить зрителя к *катарсису*, и здесь немалая роль отводится инновационным светотехническим приёмам.

Подобные новации в театральном деле, естественно, потребовали внесения корректировок в программу подготовки универсальных по природе специалистов, необходимых в данной области. Профессиональное обра-

зование театрального светохудожника, помимо знаний технологии и основ сценографии, требует серьёзной академической художественной подготовки.

Методический опыт, приобретённый при обучении будущих дизайнеров на кафедре Средовой дизайн МГХПА им. С.Г. Строганова в области сценографии, может послужить наглядным примером использования новых проектных подходов к решению комплексных задач сценографии. В числе приёмов, используемых в учебном проектировании кафедры: методика средового подхода, метод сценарного моделирования с построением виртуальной проектной модели и метод концептуального проектирования.

Ключевые слова: художник по свету, светодизайн, сценография, синтез искусств, учебное проектирование, концептуальное проектирование, сценарное моделирование, катарсис, построение сценического пространства.

1. ВВЕДЕНИЕ

1.1. Основы современных тенденций театрального света

«Гаснет рампa – театра больше нет», – говаривал М. Булгаков. Свет – основа театрального действия, будучи встроенным в структуру сценографии на правах одного из главных действующих лиц. На выразительность театральной постановки влияет её синтетическая природа. Архитектурная-художественная-актерская-драматургическая-музыкальная модель спектакля оживает в визуальной партитуре, разыгрываемой по световому сценарию. Афоризм одного из самых востребованных сегодня театральных художников А. Мельника гласит: «Художник по свету должен «слушать глазами».

Новейшие тенденции современного синтетического театрального действия были заложены ещё в последней четверти XIX столетия Р. Вагнером в его версии «всенародной драмы». На основе национального эпоса драматургия опер великого композитора соединила музыку, изобразительное, прикладное искусство, ландшафт декораций и свет. Технические достижения и стилистическая подвижность «ар-нуво» создали новые жанры свето- и цветомузыки (А. Скрябин, М. Чюрлёнис). В. Мейерхольд синтезировал сценографию с авангардными футуристическими решениями в области графического дизайна, корни которого лежат в массовой культуре. «С помощью световой проекции режиссёр вводил в спектакли текстовые изображения лозунгов, призывов, броские названия эпизодов, реклам и т.д.» [1].

В эпоху «ар-деко» одновременно с поисками междисциплинарного синтеза намечается и обратный процесс – театральное зрелище само становится силой, инициирующей инновационные процессы в светодизайне и других видах визуального искусства. Основанием для возникновения подобных процессов стала глобальная переориентация культуры на рубеже XIX–XX веков с «изобразительности» на «выразительность», с «литературоцентризма» на «зрелищецентризм». «... Наша эпоха менее всего словесная... в XX в. мы сталкиваемся с «эхом» форм общения, сформированных на начальных этапах человеческой истории. Своё концентрированное выражение эти формы сегодня находят в зрелищном общении» [2].

Проект освещения интерьера, разработанный для французских океанских лайнеров «Париж» и «Нормандия» (1930-е), также был подчинён законам сценографии. По мысли Рене Лалика, сверкающие драгоценности посетителей корабельного ресторана и мерцающие световые колонны должны были ослеплять гостей и демонстрировать роскошь и красоту интерьера помещения (арх. Пэтон и Пэкон), превратив его в «версию последнего дня зеркального зала в Версале» [3].

Новые возможности позволили использовать экономически выгодные методы промышленного производства прессованного стекла. По сути, была создана новая сфера индустрии

архитектурного стекла большой толщины, сохраняющего свою прозрачность, блеск и матовую поверхность, иногда покрытую гравированным рисунком. Мистика образов подсвеченного прессованного рельефного стекла интерьерных декораций Лалика формировала драматургию, близкую по накалу к соборной литургии храма Св. Матфея (*St. Matthew*), известной как Стекланная церковь в Милбруке (о. Джерси, в составе Нормандских островов).

Театрализованная игра с интерьерным пространством породила новые формы и типы искусственного освещения: световые карнизы из стеклянных прессованных панелей с сечением в четверть круга и литым орнаментом на наружном изгибе. Впервые литые формы стекла, используемого для подвесных плафонов и люстр (дизайн Р. Лалика), создали необычный рассеянный свет, где потолок служил в качестве отражателя. Электрический свет создавал на плафоне эффект двух уровней – рельефов декора и фона (как продолжение «игры» с пространством и зрителем). По словам искусствоведа Г. Моури (1865–1943): «Это коммерческое искусство, прекрасно продуманное и понятное, что позволяет внедрять действительно современную и живую художественную ноту в оформление ... и в организацию и декор общественных зданий, таких как ... танцзалы, магазины, банки, театры, концертные залы и т.д. Это открыто несёт знак нашей сложной цивилизации, жаждущей элегантности, новизны, комфорта и роскоши» [3].

1.2. Фактор инновационных технологий в световой сценографии

Театр отличает от других видов синтетических искусств великая сила традиции. «Поиски и открытия художников театра начала XX столетия определили развитие мирового сценического искусства на многие годы вперёд. Современные технологии только развивают направления, заложенные десятки лет назад» [4]. Одно из них – поле эксперимента световой сценографии, которое продолжает обогащаться множеством инноваций, рождённых цифровой эпохой.

Кардинальная смена парадигм в световом искусстве превратила его из дополнения к предметно-простран-

ственной среде в подлинный инструмент формообразования и художественного моделирования. Возникли понятия «светопластика», «светоформа» и «светопространство» (Н.И. Щепетков) как самостоятельные проектные форматы, способные целиком охватить сценическое пространство. Подобная концептуальная установка явилась следствием предложенного английским исследователем К. Каттлом (*Christopher Cuttle*) поэтапного развития области деятельности светодизайнера, «определяющего основные темы, на которые направлены цели профессии. Предполагается, что целью первого этапа было обеспечение равномерного освещения в горизонтальном плане, ... второго этапа – создать освещение, отвечающее потребностям человека на основе визуальных характеристик. Это подводит нас к нынешней эпохе, поскольку ... второй этап не достиг своей цели ... Привычные представления об эффективности и результативности освещения перевёрнуты с ног на голову, и раскрывается совершенно другой взгляд на дизайн освещения ... Существенным отличием является переход от оценки света, распространяющегося в плане, к оценке *света, попадающего в глаз*. Такое изменение мышления может рассматриваться как предвестник третьей стадии профессии «освещения» [5], учитывающей эмоциональное состояние зрителя.

Театр XXI столетия изменил характер визуального восприятия сценического зрелища даже в сравнении с театром тридцатилетней давности. Сегодняшнему потребителю, пресыщенному избыточным по динамике медиарядом, часто не хватает эмоций и психологического накала в среде, решённой традиционной световой партитурой. Мы уже не мыслим себя вне элементов «шоу», принёсшего с собой в театр дополнительный элемент динамики. Сюда, безусловно, относится видео-мэппинг в виде 2D- и 3D-проекции (экраном выступают полупрозрачные сетки-занавеси, дым, поток воды и т.п.). Сюда же можно причислить лазерные инсталляции, голографические скульптуры, арт-объекты на основе цветоцветовой динамики и т.д., которые постепенно входят в сценическую драматургию. Телепроекции и концертные приёмы с их особыми световыми эффектами активно вплетаются в сценическое

действие. Их цель – эффективно воздействовать на эмоции зрителей, усиливать акценты, подчёркивать режиссёрские ремарки. Однако суггестивная природа света, заключённая «в непредсказуемой динамике световых потоков, воздействующих на нервные центры человеческого организма, таит много таинственных и неисследованных механизмов, призванных нести в разнообразных дозах столь необходимое театру гипнотическое начало» [6]. Учитывая мощное психологическое воздействие света на зрительскую психику, следует использовать грамотный подход и большую осторожность при организации светового сценического пространства.

Часто иллюзорное пространство становится аналогом романтического «выражения невыразимого», ставшего, наконец, подвластным художнику. Ещё И.Ф. Шиллер заметил, что, «... всё то, что чувствует наша душа в виде смутных, неясных ощущений, театр преподносит нам в громких словах и ярких образах, сила которых поражает нас» [7]. В моноспектакле «Человеческий голос» («Геликон-опера»), художник Р. Протасов, режиссёр Д. Бертман, (2019) в момент наивысшего эмоционального напряжения микрофон на сцене загорается ярким светом на время звучания арии в исполнении Т. Гвердцителли, символизируя «свет души» певицы (с эпохи Просвещения утвердилось признание равенства света и разума).

В спектакле «Ревизор» (Александринский театр, режиссёр В. Фокин, художник А. Боровский) для сочинения фантазмагорических, гиперболизированных, гротесковых, загадочных сюжетов и решения образного пространства Санкт-Петербурга, способного «закрутить, завьюжить, уничтожить», специально пригласили И. Эпельбаума из театра «Тень», а плоскостные декорации выполняли функцию экранной поверхности [8].

Мнение авторитетного режиссёра М. Захарова подтверждает художественный приоритет подобных эффектов. Мэтр признаёт, что «... свет призван служить катализатором всех актёрских процессов и даже детонатором возможного эмоционального взрыва, ведущего к *катарсису* – тому потрясению, ... ради которого люди, обременённые современной информацией, всё-таки ещё ходят в театр. Причудливо разработанная свето-



Рис. 1. Дизайн-концепция спектакля по произведению Г.-Х. Андерсена «Снежная королева». 2009 г. Курсовой проект. 5 курс. Программа «Специалитет». Автор: Малютенко Ю.А. Преподаватели: проф. Рузова Е.И., проф. Заева-Бурдонская Е.А.

вая партитура в талантливом сценографическом сочинении, объединяясь на единой энергетической основе с актёрским вдохновением, образует единое целое» [6]. Отвечая на вопрос, какова будет роль видеопроекции в оформлении оперных и драматических постановок в будущем, и не заменят ли проекторы традиционные декорации, Э. Роллер, художник по свету Цюрихской оперы (*известной своими инновационными светотехническими подходами в постановках – прим. авт.*), не колебался с ответом: «Всё зависит от замысла режиссёра и сценографических решений. Но я не думаю, что проекционные технологии полностью вытеснят театральные декорации» [9].

1.3. Особенности подготовки театрального художника по свету

Очевидно, что дальнейшее развитие двойственной художественно-технической световой партитуры спектакля имеет два измерения. Первое – это использование всё более широких и бесконечных по возможностям технических и технологических новшеств. Второе – подключение художественного воображения, в формировании которого не последнюю роль играет программа подготовки будущего специалиста. В этом и заключён феномен универсальности профессии театрального художника по свету, которая по сей день является для многих специалистов результатом случайного выбора. В реальности театральные вузы обучают студентов специальности «художник-технолог», но программа изобилует теоретическими дисципли-

нами в ущерб практическим. Данная ситуация характерна не только для художников по свету, но и для светодизайнеров вообще. По дисциплине «светотехника» «...нынешние студенты, подготовленные значительно лучше и разностороннее, нежели их сверстники 50 лет назад, по существу вынуждены начинать всё от «той же печки», что их отцы и деды», отмечают в своей публикации М.А. Канатенко и О.М. Михайлов [10].

Театр в силу своей консервативности и средневековой структуры сохранил цеховой принцип передачи навыков кадрового ремесла «от мастера – ученику». Оттого, что в профессии «нет образования, очень важно чувство школы... Не существует даже, что само по себе смешно, нормальной проектной школы театрального света» [11]. Распределение ролей «учителя» и «ученика» роднит театр с методикой художественного образования, где так же, как и в театре, миссия наставника продолжает определять качество профессиональных знаний и навыков студента, сохраняя актуальность авторского, свободного, творческого отношения к рабочему материалу. Благодаря эмоционально-художественному потенциалу нам по-прежнему интересны постановки великих художников театра: Е. Ганзбурга – художника по свету (ТЮЗ им. А. Брянцева, театр им. Ленсовета, БДТ, Александринский театр); О. Шейнциса – главного сценографа и М. Бабенко – художника по свету «Ленкома» («Юнона и Авось», «Поминальная молитва»); Д. Боровского, работавшего с режиссёрами МХАТа, Малого театра, Театра на Таганке, «Современника» и т.д. «Мощь

его сценографии ... макеты и эскизы, ... сам спектакль, ... превращения пространства, цвета, света, взаимодействия декорации с музыкой» [12], безусловно, говорят о синтетическом таланте художника. Не случайно в работах Д. Боровского просматривается академическая традиция «классики» стилевых аллюзий (опера Прокофьева «Игрок»), где «архитектурные первоисточники от высокого Ренессанса до стиля модерн даны в редакции конструкторивиста» [12].

В своих «Уроках сценического освещения» Н. Фрейзер (*Neil Fraser*), куратор Технического факультета Королевской академии драматического искусства в Лондоне, перечисляя учащимся результаты, которые необходимо достигать с помощью сценического освещения, среди прочего выделил «настроение сцены и покорение специальными эффектами». Он отдавал приоритет инновационным и художественным подходам к проектированию: «на практике тестировать идеи, пробовать что-то новое, исследовать и творить, учиться у живописцев использовать свет и выстраивать композицию своих картин. Хорошими примерами могут стать творения Рембрандта, Караваджо или Дэвида Хокни» [13]. Магистерская программа знаменитой художественной Школы «Parsons» (Нью-Йорк) – мирового лидера в области театрального, архитектурного, интерьерного и выставочного освещения, а также проектирования и изготовления оборудования – предполагает «междисциплинарные варианты обучения, позволяющие студентам развить глубокое техническое и эстетическое понимание взаимосвязи между светом, архитектурой и дизайном интерьера» [14].

1.4. Учебное проектирование

Попробуем рассмотреть некоторые принципы использования театрального света и связанные с ними художественные возможности на примере учебных проектов кафедры «Средовой дизайн» МГХПА им. С.Г. Строганова. В 1906 г. К.С. Станиславский в «Настольной книге драматического артиста» писал: «Ни учебника, ни грамматики драматического искусства быть не может и не должно. В тот момент, когда станет возможным втиснуть наше искусство в узкие, скучные и прямолинейные рамки грамматики



Рис. 2. Дизайн-проект спектакля «Алладин» по мотивам сказки «Волшебная лампа Алладина». 2009 г. Курсовой проект. 5 курс. Программа «Специалитет». Автор: Шония Э. Преподаватели: проф. Заева-Бурдонская Е.А., проф. Рузова Е.И.

или учебника, придётся признать, что наше искусство перестало существовать» [15]. Тем сложнее путь к эксперименту, осуществляемому в учебных проектах в области сценографии. Выбранные методики проектирования обусловлены приданием творческому поиску полной свободы, сохранением уважения к позиции автора произведения, стремлением стимулировать художественные процессы при учёте фундаментальных композиционных и художественно-образных закономерностей построения сценического пространства.

2. МЕТОД ИССЛЕДОВАНИЯ

Принципиальной установкой театралью художника служит возможность говорить только о творческих принципах, а не об абстрактных универсальных методах формирования светового пространства сцены. В каждом случае это будет свой подход к проектированию, выбор которого зависит, в основном, от художественной задачи спектакля. Но в любом случае приоритет в проектной подходе остаётся за художественно-гуманитарной составляющей.

2.1. Методика средового подхода

Средовой подход – аналог системного подхода – стал основанием для анализа и разработки проектов сценографии, созданных в рамках курсового проектирования на кафедре «Средовой дизайн». Он базируется на важнейшей контекстуальной уста-

новке, адаптированной дизайном вместе с парадигмой постмодернизма в 1970-х. Контекст всегда предполагает диалог двух составляющих (*по М.М. Бахтину*): «текста-контекста» или «объекта» и его контекстуального «фона». Средовой подход изначально включает в себя на правах основной составляющей более сложную систему «проектируемой среды», являющуюся основанием для синтеза искусств и использования присущих ему средств выразительности. Свет входит в «текст» сценографии на правах интеграла, давая подлинную жизнь спектаклю.

2.2. Метод сценарного моделирования с построением виртуальной проектной модели

В рамках средового подхода формируется метод сценарного моделирования, содержащий «...методологию, направленную на активное использование дизайнерской интуиции и рефлексии, благодаря которым дизайнер может инициировать внедрение в дизайнерскую среду инновационных процессов формообразования. Заделом для создания такой проектной методологии вполне может служить объединение вполне методик сценарного моделирования (В.Ф. Сидоренко)» [16]. Сценарий позволяет планировать работу над объектом поэтапно, в соответствии с целью и задачами, формируя наиболее оптимальные параметры среды, воспринимающей влияние значительного количества факторов (к которым относится и синтетическое театральное пространство).

Проектный метод сценарного моделирования сходен с приёмами театриализации пространства. Это осознанное создание «удачных» точек восприятия предполагает покаторовое раскрытие видов (мизансцен), формирующих у зрителя восприятие среды с учётом ролевых позиций «средовых исследователей», распределение сценарных осей, составление мизансцен, введение приёмов «интриги» и т.д. [17] Сценарий придаёт стабильную по природе световой среде зрительную динамику. Визуализация имматериальных виртуальных световых объектов и образов, смена визуальных световых кадров имеют сугубо авторскую эмоциональную творческую подоснову. Не случайно, профессия «светорежиссёр» служит аналогом профессии «художник по свету». Приход мультимедийных приёмов организации света на сцену, отразившийся в инженерной, режиссёрской и художественной составляющих, открыл путь интерактивности сценического пространства и его динамичному наполнению, активному воздействию световых образов, в том числе в психологическом диалоге актёра со зрителем. Цифровое моделирование облегчило построение объёмно-пространственных аналоговых моделей, облегчающих работу над световой партитурой с учётом разных «точек зрения».

2.3. Метод концептуального проектирования

Принцип концептуального проектирования основан на гуманитарном подходе к средовому проектированию, точкой отсчёта которого всегда является человек. Концепция светового проекта во многих случаях может пересекаться с общим средовым сценарием, но чаще выходит за рамки смысловой канвы сюжета, захватывая в том числе художественно-технические аспекты, проектные технологии и визуальные эффекты. Концепт охватывает проект световой организации сценического пространства от выработки идейной стратегии (как результата предпроектного анализа) и определения системы проектных подходов до создания визуальной рабочей модели световой среды – видимого образа будущего объекта. Правомочность выбора концептуального подхода к световому проектированию спектакля подтверждается пер-



Рис. 3. Дизайн-проект спектакля по пьесе Г. Ибсена «Пер Гюнт». 2009 г. Курсовой проект. 5 курс. Программа «Специалитет». Автор: Зыкова Н. Преподаватели: проф. Рузова Е.И., проф. Заева-Бурдонская Е.А.

вичностью художественного начала в работе «художника по свету». Светодизайнер всё активнее претендует на право формировать световой образ сценического пространства в связи с приходом в сценографию инновационных световых технологий. В установленном порядке работы над светопроектом, включающем постановку задачи, рождение замысла и создание художественных образов, просматривается очевидная аналогия с академическим творчеством, обладающим широким потенциалом проектных возможностей по созданию светового сценария.

3. РЕЗУЛЬТАТЫ

Особенность всех учебных проектов – их концептуальная основа. Технология проектирования обозначает как приоритет образную художественную составляющую сценографии, включающую разработку структуры последовательного чередования мизансцен спектакля, проектирование объёмно-пространственных и плоскостных декораций (если таковые присутствуют), 3D-визуализацию пространства сцены, разработку сценических костюмов и подготовку графических рекламных материалов.

3.1. «Метафора света»

Современные технологии позволяют новое прочтение знакомых, в том числе ставших классическими, произведений. Развивая традиционные направления сценографии, заложенные в прошлом, светотехнологии позволяют создавать на сцене яркие световые динамичные образы, придавая

декорациям характер «говорящего» объекта. «Метафора света» вторгается в ткань сценария, проявляясь не столько на уровне формы, сколько на уровне смысла.

В проекте сценографии известной сказки Г.-Х. Андерсена «Снежная королева» (рис. 1) свет становится метафорой голубовато-белого «льда», приобретая облик движущихся полупрозрачных фигурных и модульных декораций. С помощью видеопроекции на прозрачной сетке-экране создаётся иллюзия снегопада и метели, «вырастают» гигантские розы, появляются зимние заиндевевшие деревья. Свет «зажигает» луну на небосводе, подсвечивает окна домов и т.д.

Достоинством проекта является минимум декораций при большой композиционной вариативности при смене эпизодов спектакля. Пространство сцены выстроено с учётом предоставления максимальной свободы для движения актёров.

Возможности создания проектов, интегрирующих инновационный мультимедийный цифровой контент и проектов, основанных на возможностях светотехнологий, в систему традиционного пластического формообразования сцены, открылись на рубеже веков/тысячелетий. В одном спектакле может соединяться масса технологических приёмов, отчасти напоминая среду эстрадных шоу, целью которых становится создание сложного сказочного образа – «выражение невыразимого». С помощью лазерной проекции создаётся вихрь, сопровождающий появление джина из бутылки, проекционные технологии позволяют героям «полетать» на ковре, выстроить стены города-миража, и т.д. Направленные световые лучи фонтана дополняют подсвеченные полупрозрачные ширмы декораций интерьера дворца султана (рис. 2).

Свет не просто создаёт формы образы театральной среды, но и организует пространство, акцентирует планы, придаёт сценической «коробке» ощущение бесконечности, глубины и динамики.

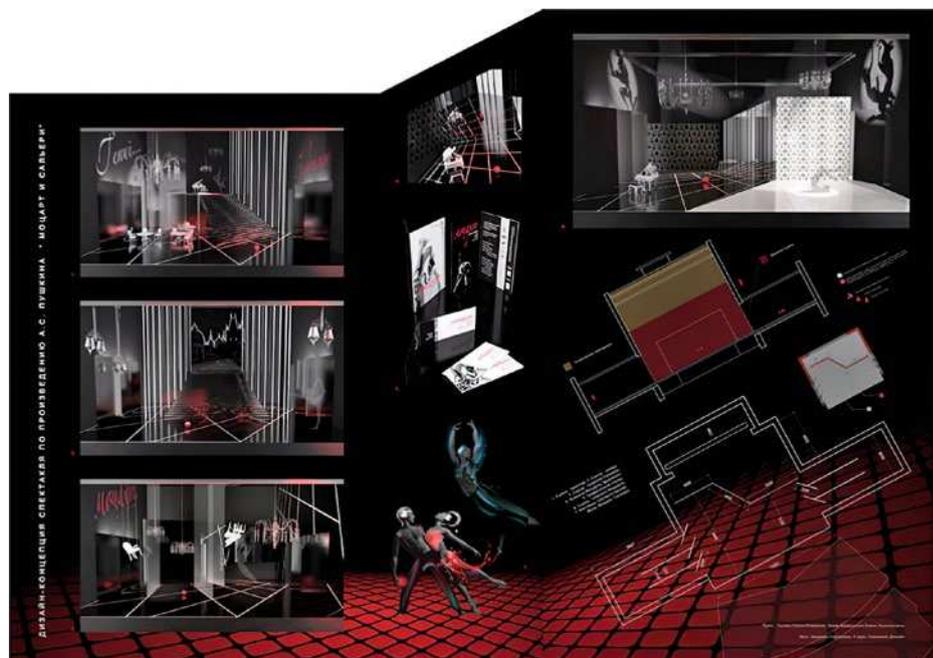
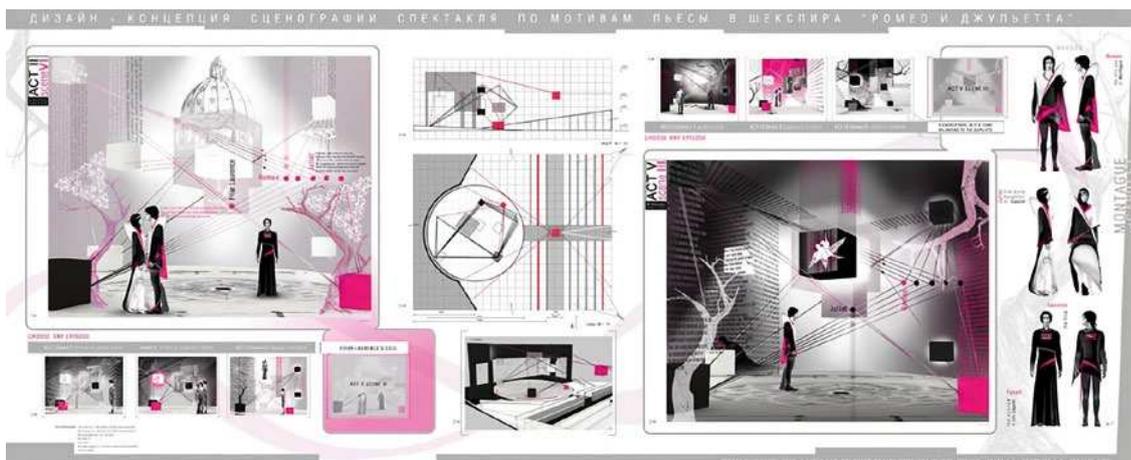


Рис. 4. Дизайн-концепция спектакля по произведению А.С. Пушкина «Моцарт и Сальери». 2009 г. Курсовой проект. 5 курс. Программа «Специалитет». Автор: Баимова Е. Преподаватели: проф. Рузова Е.И., проф. Заева-Бурдонская Е.А.

Рис. 5. Дизайн-концепция сценографии спектакля по мотивам пьесы В. Шекспира «Ромео и Джульетта». 2006 г. Курсовой проект. 5 курс. Программа «Специалитет». Автор: Симатова О. Преподаватели: проф. Заева-Бурдонская Е.А., проф. Рузова Е.И.



Основным приёмом, поддерживающим кинетику действия, становится постоянная проекция на задник сцены. На всём протяжении спектакля транслируется процесс создания картин к той или иной сцене спектакля в песчаной технике. Тонкость драматургии Г. Ибсена метафорически воспроизводится через мимолётность и зыбкость перетекающих песчинок, цветовую палитру света картинной плоскости. Все воспроизведённые в проекте песчаные картины выполнены студентом самостоятельно (рис. 3).

Проект, созданный по мотивам известной трагедии А.С. Пушкина, предназначен для постановки на сцене Театра Мимики и Жеста (Москва). Спектакль рассчитан на глухих зрителей, что определяет особенности в образном построении сцен (рис. 4). Драматический танец, пластичные движения актёров, являющиеся основой «текста» пьесы, сопровождаются видеопроекциями из арсенала «театра теней». Выбор чёрно-белых силуэтных световых картин и красный свет прожекторов – образные метафоры «крови» и отравленного «вина» – усиливают мистический драматизм сцены. Зеркальная отражающая поверхность изломанного рельефного пола умножает кроваво-красные и белые потоки света, а светодиодные ленты импровизированных «колонн» имитируют в пространстве чёрной коробки сцены бесконечность пространственной глубины.

3.2. Спектакль в отражении

Классика У. Шекспира бессмертна, и это постоянный стимул для творчества. В журнале «Light» приводится следующая цитата: «...есть произведения, в которых заложена возмож-

ность раздвинуть рамки привычных подходов к постановке и не просто преподнести публике знакомую историю, а создать потрясающее единство музыки и декораций. В опере «Гамлет-машина» В. Рима известнейшая пьеса Шекспира оборачивается гротеском, драма распадается на фрагменты, и это даёт актёрам огромный простор для интерпретаций» [9]. В описываемой журналом постановке

Цюрихской оперы задействованы проекторы высокого разрешения *Christie Boxer 4K30*.

В прочтении учебного проекта о Ромео и Джульетте (рис. 5) тема любви звучит как вневременная модель великой человеческой драмы, пересказанная художником-постановщиком с помощью высоких технологий.

Проекции не только выстраивают отдельные картины, полностью осво-

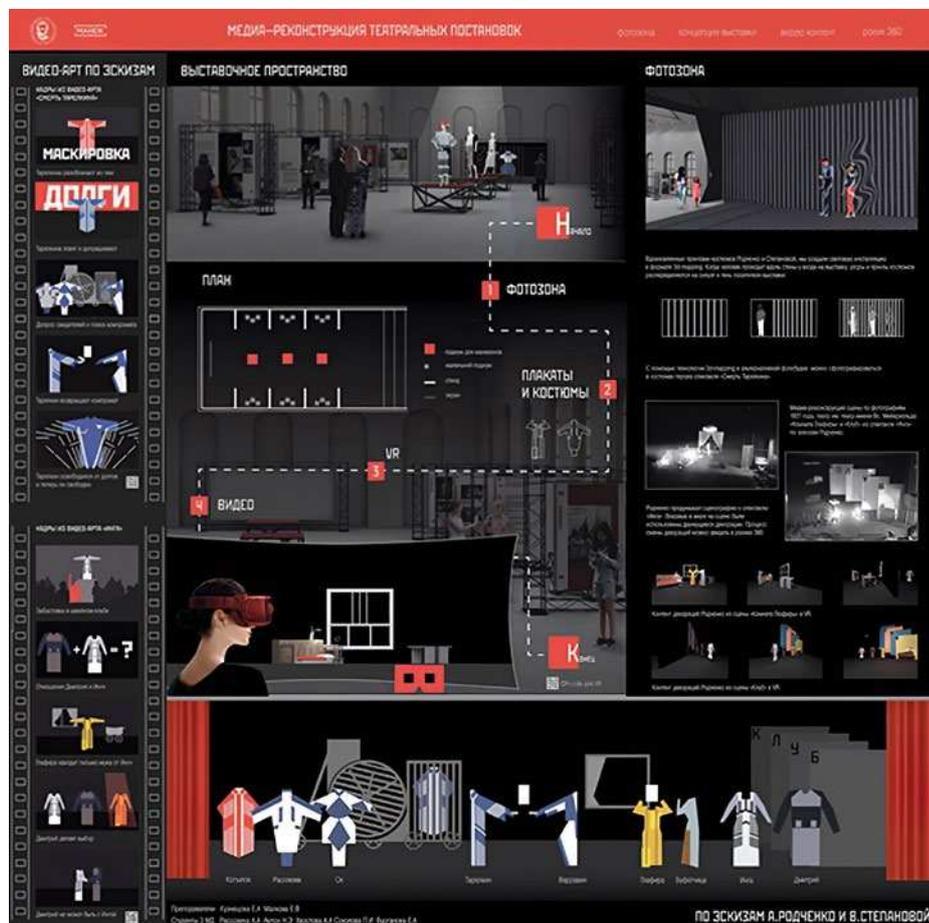


Рис. 6. Проект «Медиа-реконструкция костюмов к спектаклям «Инга» и «Смерть Тарелкина» по эскизам Родченко и Степановой». 2019 г. Курсовой проект. 3 курс. Программа «Бакалавриат». Авторы: Акгюн Н.Э., Рассохина А.А., Бурганова Е.И. Соколова П.А., Хвостова А.А. Преподаватели: ст. преп. Кузнецова Е.А., преп. Малкова Е.В.

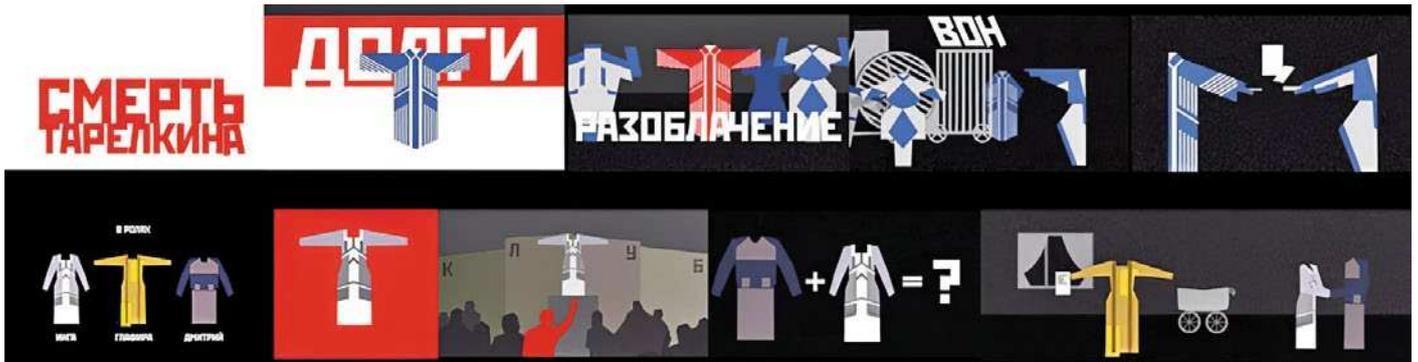


Рис. 7. Раскадровка видео реконструкции сюжетов спектаклей «Смерть Тарелкина» и «Инга». Проект «Медиа-реконструкции костюмов к спектаклям «Инга» и «Смерть Тарелкина» по эскизам Родченко и Степановой». 2019 г. Курсовой проект. 3 курс. Программа «Бакалавриат». Авторы: Акгюн Н.Э., Рассохина А.А., Бурганова Е.И. Соколова П.А., Хвостова А.А. Преподаватели: ст. преп. Кузнецова Е.А., преп. Малкова Е.В.

бождая пространство сцены для актёров, но и усиливают эмоциональное поле спектакля. Волшебство световых иллюзий вводит события времён итальянского Возрождения в новую систему ценностей, сформированную эпохой массмедиа, Интернета и социальных сетей. Визуализация проекта представляет собой микс рекламных материалов спектакля, взятых с сайта театра. Подобный подход в корне меняет характер работы над самой темой. Возникает новый подход к сценографии – через призму экрана, с системой подачи информации, с помощью приёмов инфографики и т.д.

3.3. Медиа-реконструкция спектакля

Новый профиль кафедры «Средовой дизайн», именуемый «Дизайн мультимедиа», расширил границы инновации в сценическом пространстве, отвергая приёмы традиционного пластического формообразования. Формат эксперимента, неразрывно связанный с авангардным искусством, постоянно присутствует в творческих поисках студентов Строгановки XXI века. Всё это будет доступно посетителям выставки, посвящённой 100-летию Конструктивизма «АВАНГАРД-ТЕАТР-МОДА 2019», организуемой фондом «Магия моды», которая пройдёт в московском Выставочном зале «Малый Манеж» в октябре 2019 г. (куратор проекта – президент фонда «Магия моды» – Н.Б. Козлова). В экспозиции будут представлены архивные материалы из личных коллек-

ций семьи А. Родченко¹ – эскизы проектов костюмов к спектаклям «Инга» и «Смерть Тарелкина», выполненные А. Родченко и В. Степановой.

Режиссёры-новаторы начала XX столетия в поисках путей революционного обновления театра обратились к художникам-футуристам. Ныне цифровая революция модифицировала знаковые произведения великих дизайнеров прошлого и представила их в «снятом» варианте в мультимедийном формате. Проектная реконструкция спектакля решена в формате «video-art». Краткое содержание пьесы пересказано игрой «актёров», через эстетику театральных костюмов воспроизводятся оригинальный ход размышления авторов в работе над эскизами к спектаклю. Видеоряд входит в более широкое пространство медийной выставки: с интерактивной фотозоной в виде текстур из сцены спектакля в формате «3D mapping» (тюремная решётка на стене в стилизации элементов костюма Тарелкина); в виде зала с афишами, плакатами и манекенами в оригинальных театральных костюмах; с фрагментами декораций спектаклей в виртуальной реальности (VR) в формате 360° («Сны художника») (рис. 6 и 7).

Формат медиа-реконструкции открыл новый способ работы с театральной темой. Сценарий интерактива основан на версиях форм, знакомых по эскизам исторических экспонатов. Современный зритель, весьма далёкий от интриги, волновавшей наших соотечественников в 1920-х, постепенно погружается в стихию не-

знакомых коллизий с помощью, ставших уже привычными, технических средств. Этот приём помогает людям принять и прочувствовать уникальный накал художественных страстей, вызвавших к жизни великую эпоху КОНСТРУКТИВИЗМА, ставшую точкой отсчёта мирового дизайнера и до сих пор во многом определяющую творческие поиски студентов сегодняшней Строгановки.

4. ОБСУЖДЕНИЕ И ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Световые и цифровые технологии стали платформой для революционных изменений в театре с конца XX столетия. Широчайший спектр возможностей, пришедший с эпохой «медиа-арта», заключающийся в поиске новых форм сценографии, нередко расшатывает театральные основы, подменяя их суррогатом шоу-представлений. К.С. Станиславский сказал: «Если бы смысл театра был только в развлекательном зрелище, быть может, и не стоило бы класть в него столько труда. Но театр есть искусство отражать жизнь» [18].

Учебное проектирование становится своеобразным полем для проведения эксперимента и выработки новых выразительных приёмов сценографии. Студенческая мысль, не скованная ограничениями, находит решения традиционных тем в инверсионном, часто парадоксальном проектном духе. Материал драматургии сам «ведёт» проектировщика, подчас не обладающего даже специальными знаниями в области теории и практики сценографического мастерства. «Постоянно бывают случаи, когда свет, картина, спектакль создаются или интуитивно, или наперекор всем канонам. В этом и заклю-

¹ Оригинальные материалы – проекты костюмов к спектаклям «Инга» и «Смерть Тарелкина» были любезно предоставлены внуком А. Родченко – профессором, доктором искусствоведения А.Н. Лаврентьевым, проректором по науке МГХПА им. С.Г. Строганова. – Прим. авт.

чается парадокс искусства ... Можно случайно ... поставить замечательный спектакль, не владея профессией режиссёра» [4].

В широком пространстве технологий, рождённых цифровой революцией, светодизайн уверенно вошёл в театральную сценографию. Новая модель театрального света формирует свою концепцию, свою систему визуальных ценностей, где исходным параметром, стабилизирующим мультимедийные инновации на сцене, остаются актёр и воспринимающий спектакль зритель. Замысел режиссёра или художника-постановщика уже изначально учитывает образные возможности новых технологий. Художник начинает мыслить световыми формами. Термин «световое мышление» (*lighting thinking*), используется для обозначения дизайна, ставящего человека в центр задачи как точку отсчёта. Свет создан вокруг него, и он – точка притяжения» [19].

Опыт проведения учебных занятий в области сценографии на примере кафедры «Средовой дизайн» МГХПА им. С.Г. Строганова показал усиление мультимедийного начала в выборе проектных методик и наметил дальнейший отход от бутафорской системы решения пространства. Это подтверждают работы в области сценографии, созданные за последние годы на кафедре «Средовой дизайн» по профилю «Дизайн мультимедиа», в которых отсутствует объёмно-пространственное моделирование, но при этом сохраняется жанровое своеобразие спектакля. Во многом природный вкус и привитая в процессе обучения культура проектирования сохраняются и развиваются благодаря основательной академической художественной подготовке.

Художники по свету в большей степени пока – самоучки, а одноимённая специальность находится в процессе становления в силу односторонности методик профессиональной подготовки. Преобладающая по сей день каноническая, цеховая система обучения «из уст в уста» (передача опыта от мастера ученику), возможно, обогатится методиками, отработанными в области подготовки дизайнеров среды и мультимедиа. Использование новых проектных приёмов 3D-визуализации, построения рабочих моделей картин и сцен спектакля, создания цифровых раскадровок сюжетов и т.д. мо-

жет стать важным этапом работы художника-постановщика и художника по свету над значимыми драматическими произведениями. Соответствующие проектные модели позволят заранее «проигрывать» и выявлять необходимость тех технологических эффектов, которые можно потом воплотить в бюджетном формате.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. URL: https://www.krugosvet.ru/enc/kultura_i_obrazovanie/teatr_i_kino/SVET_TEATRALNI.html (дата обращения: 01.08.2019).
2. Социально-психологические проблемы научно-технического прогресса / Под ред. Б.Д. Парыгина. – Л.: Наука, 1982, 169
3. Bayer P., Waller M. The Art of René Laliq. – London: Eagle, 2002. – 186 p.
4. Мельник А.В. Театрально-концертное постановочное освещение. Постановочное видео. (ред. 2018 г.). URL: <https://lightsoundnews.ru/a-melnik-teatralno-kontsertnoe-postanovochnoe-osveshhenie-osnovy-postanovochno-video/> (дата обращения: 01.08.2019).
5. Cuttle C. Towards the third stage of the lighting profession. *Lighting Research and Technology* 42(1):73–93 · March 2010 with 235 Reads DOI: 10.1177/1477153509104013.
6. Захаров М. «Свет – это мировоззрение». О сценографии и Олеге Шейнце. URL: <http://www.l-teatr.ru/directors/oleg-sheyntsis/47/> (дата обращения: 01.08.2019).
7. URL: <https://antrio.ru/iogann-fridrih-shiller-citaty/> (дата обращения: 01.08.2019).
8. Берёзкин В. Александр Боровский. Вопросы театра/ PROSCAENIUM. М., 2010, 69–92.
9. В Цюрихском оперном театре музыка становится зримой. – *Light. Sound. News.* № 3 (56), 2018, 24–25.
10. Канатенко М.А., Михайлов О.М. Дисциплина «светотехника» в государственных университетах и образовательном стандарте. С-Пб. URL: http://lightonline.ru/svet/articles/discipline_svetotehnika_v_obrazovanii.html (дата обращения: 01.08.2019).
11. URL: <http://ptj.spb.ru/archive/29/face-to-face-29/svet-eto-dyxanie-sceny/> (дата обращения: 01.08.2019).
12. Михайлова А. «Боровский в опере», 2007. URL: <http://timetable.theatre.ru/theatre-653/perf-22866/> (дата обращения: 01.08.2019).
13. Фрейзер Н. / Fraser N. The light fantastic. Уроки сценического освещения. Часть 1. Введение. URL: sistema-stage.ru/brand_news/neil-fraser-light-lessons-01 (дата обращения: 01.08.2019).
14. URL: https://www.subjectart.ru/universities/parsons_school_of_design/ (дата обращения: 01.08.2019).

15. Станиславский К.С. Работа актёра над собой. URL: <https://www.psyoffice.ru/9/stank01/txt17.html> (дата обращения: 01.08.2019).

16. Кузнецова Г.Н. Принципы взаимодействия структурного формообразования и визуальной экологии в средовом дизайне / Автореф. дис. ... к-та искусствовед. – М.: 2011².

17. Юнг И.С. Реализация метода сценарного моделирования городского общественного пространства: Проблемы теории и истории архитектуры Украины. – 2013. – Вып.13. – С. 241–247.

18. URL: <https://www.kritika24.ru/page.php?id=43880> (дата обращения: 01.08.2019).

19. Skarlatou A.-Z. Light Effects in the Design Process. Bartlett Faculty of the Built Environment, University College London, in candidacy for the Degree of Doctorate of Philosophy, Department of Architecture. London July 2010, 270. URL: <http://discovery.ucl.ac.uk/1211391/1/1211391.pdf> (дата обращения: 01.08.2019).

² Более подробно метод сценарного моделирования описан в статье «Идея сценарного моделирования» в сб. Теоретические и методические проблемы художественного конструирования комплексных объектов. – М., 1979. (Труды ВНИИТЭ. Сер. Техническая эстетика: вып. 22. – С. 137–148.



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 и 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

Влияние поляризации света на световое поле в сценах с многократным отражением

В.П. БУДАК¹, А.В. ГРИМАЙЛО²

НИУ «МЭИ», Москва

¹E-mail: budakvp@gmail.com;

²E-mail: grimailoav@gmail.com

Аннотация

Статья посвящена роли поляризации при расчёте многократных отражений. Приведена математическая модель многократных отражений на основе вектора Стокса для описания луча и матриц Мюллера для описания свойств поверхности. На основе данной модели уравнение глобального освещения обобщается на случай поляризации и сводится к объёмному интегрированию. Это позволяет получить выражение для локальных оценок метода Монте-Карло и впервые использовать их для оценки светораспределения в сцене с учётом поляризации. Полученная математическая модель была реализована в программной среде на примере сцены, поверхности которой имеют как диффузную составляющую в отражении, так и зеркальную. Приведённые в статье результаты показывают, что разница при расчётах с учётом поляризации может достигать более 30 % по сравнению со стандартным моделированием.

Ключевые слова: поляризация, многократные отражения, локальные оценки, метод Монте-Карло, матрица Мюллера, вектор Стокса.

Введение

Развитие вычислительной техники и программного обеспечения в последние десятилетия привело к тому, что сегодня проектирование любой осветительной установки сопровождается моделированием светового поля в сценах освещения, которое будет получено при использовании выбранных осветительных приборов. Важнейшую роль при этом играет расчёт многократных отражений (МО) света от поверхностей моделируемой сцены.

В светотехнике традиционно пренебрегают явлениями поляризации света при расчётах. В случае, когда речь идёт о небольшом количестве отражений от поверхностей с преимущественно диффузным характером отражения, такое пренебрежение не вносит заметной ошибки в результат. Однако, если приходится иметь дело с такими поверхностями, у которых отражение имеет существенную зеркальную составляющую, состояние поляризации даже полностью деполаризованного света изменится уже после первого отражения, и это будет влиять на характер всех дальнейших актов взаимодействия света с поверхностями сцены.

Очевидно, что после достаточного количества переотражений свет станет снова деполаризованным. Тем не менее, остаётся неясным, как учёт поляризации повлияет на конечный результат светотехнического расчёта. Существующие на сегодняшний день оценки говорят, что расхождение в результатах между классическим расчётом

и расчётом с учётом поляризации света может достигать более 20 % [1]. Подтверждение этого будет означать необходимость учёта состояния поляризации в решении прикладных задач (например, таких как расчёт освещённости в помещении с учётом МО).

На текущий момент были опубликованы результаты большого количества исследований различных авторов [2–7], в которых показано существенное влияние поляризации на получаемые изображения сцен при моделировании светораспределения на их примере. Однако в данных исследованиях не приводится сведений о том, каким образом учёт поляризации влияет на получаемые значения величин, описывающих энергетику светового излучения. Вместе с тем именно эти величины более всего интересуют специалистов, работа которых связана с решением практических задач.

Кроме того, изображения сцен, приведённые в работах указанных авторов, показывают, что при прорисовке изображений с учётом поляризации изменяется форма и положение бликов на поверхностях сцены. Таким образом, состояние поляризации света в конечном счёте влияет не только на количественные, но и на качественные характеристики светораспределения, создаваемого той или иной осветительной установкой.

1. Фотометрическое описание поляризации света

При выборе способа описания поляризации света необходимо обратить внимание на тот факт, что все фотометрические понятия формулируются исключительно в терминах *наблюдаемых* величин. Природа этих величин обусловлена, в частности, квадратичностью приёмников оптического излучения (т.е. реакцией на мощность), конечностью их размеров и постоянной времени [8].

В свою очередь, электромагнитная теория поля оперирует такими величинами, которые *невозможно напрямую измерить экспериментально*: амплитуда и фаза волнового поля. Поэтому при описании любого эксперимента в рамках волновой оптики неизбежно появляется необходимость перехода к фотометрической трактовке светового поля [9].

Отсюда, по мнению авторов, следует, что языком описания поляризации, наиболее соответствующим процессам измерения излучения оптическим приёмником, является использование набора четырёх параметров (или, по-другому, четырёхмерный вектор-параметр), введённых Дж.Г. Стоксом в 1852 году в [10]. Эти параметры описывают свет таким образом, что если любые полученные независимо друг от друга лучи обладают одинаковыми значениями всех четырёх компонент вектор-параметра, то они являются оптически эквивалентными и никакой опыт уже не позволяет их различить [10].

В работах [8, 9, 11] показано, что параметры Стокса применительно к фотометрии имеют размерность *яркости*, которая, в свою очередь, полностью характеризует излучение. Таким образом, полное описание луча должно включать набор четырёх параметров.

Определить компоненты вектор-параметра Стокса можно, исходя из электромагнитной теории, как это сделано в [11], или экспериментально, пропуская излучение последовательно через набор поляризационных фильтров [12]. В этом случае указанные параметры определяются по реакциям J_i соответствующих оптических приёмников:

$$\begin{aligned} L_0 &= 2J_0, & L_1 &= 2(J_0 - J_1), \\ L_2 &= 2(J_2 - J_0), & L_3 &= 2(J_3 - J_0), \end{aligned} \quad (1)$$

где $J_i, i \in \overline{0,3}$, различаются установленными поляризационными фильтрами:

J_0 – нейтральный фильтр с пропусканием 0,5;

J_1 – анализатор, оптическая ось которого и направление распространения излучения определяют систему отсчёта – плоскость референции;

J_2 – анализатор с осью под углом 45° к плоскости референции;

J_3 – комплексный фильтр, состоящий из четвертьволновой пластины и анализатора под углом 45° к плоскости референции.

Необходимо особо подчеркнуть, что важнейшей характеристикой параметров Стокса является система координат, в которой они заданы – плоскость референции; относительно неё определяются горизонтальное и вертикальное положения. Причём от выбора этой плоскости зависят компоненты L_1 и L_2 , а L_0 и L_3 не зависят [12].

На каждом акте взаимодействия света со средой расчёт параметров ведётся относительно новой плоскости референции, которая связана с точкой рассеяния и получается поворотом предыдущей плоскости на соответствующий угол.

Пусть плоскость референции ζ была получена поворотом предыдущей плоскости ζ' на некоторый угол φ относительно оси Z . Тогда для определённых относительно ζ и ζ' векторов Стокса $\mathbf{L} = \{L_0, L_1, L_2, L_3\}$ и $\mathbf{L}' = \{L'_0, L'_1, L'_2, L'_3\}$ выполняется [13]:

$$\mathbf{L} = \tilde{\mathbf{R}} \mathbf{L}', \quad (2)$$

где \mathbf{L}' – вектор Стокса до взаимодействия; \mathbf{L} – вектор Стокса после взаимодействия; $\tilde{\mathbf{R}}$ – матрица вращения плоскости референции или ротатор (от лат. rotatio), которая определяется следующим образом [13]:

$$\tilde{\mathbf{R}} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos 2\varphi & \sin 2\varphi & 0 \\ 0 & -\sin 2\varphi & \cos 2\varphi & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}. \quad (3)$$

При этом знак φ задаётся из условия, что связанная с лучом система координат является правовинтовой: положительному значению угла φ соответствует поворот против часовой стрелки, если смотреть со стороны положительных значений оси Z .

Отметим, что здесь и далее используется следующая система обозначений:

$\mathbf{a}, \bar{\mathbf{a}}, \underline{\mathbf{a}}, \bar{\underline{\mathbf{a}}}$ – вектор-столбец;

$\bar{\mathbf{a}}, \underline{\mathbf{a}}, \bar{\underline{\mathbf{a}}}$ – вектор-строка;

$\hat{\mathbf{a}}, \hat{\underline{\mathbf{a}}}, \hat{\bar{\underline{\mathbf{a}}}}$ – единичный вектор-столбец;

$\bar{\mathbf{a}}, \underline{\mathbf{a}}, \bar{\underline{\mathbf{a}}}$ – матрица;

$\mathbf{a} \times \mathbf{b}$ – плоскость, образуемая векторами \mathbf{a} и \mathbf{b} с нор-

малью $\hat{\mathbf{N}} = \frac{[\mathbf{a} \times \mathbf{b}]}{|[\mathbf{a} \times \mathbf{b}]|}$.

2. Математическая модель многократных отражений света с учётом поляризации

Для создания математической модели, учитывающей поляризацию света, авторы использовали предложенный Г.В. Розенбергом в [11] метод, который основан на использовании вектор-параметра Стокса для описания состояния светового луча и матриц Мюллера для описания взаимодействия света с веществом. Рассмотрим подробнее данный метод.

Распространяясь в некоторой среде, пучок лучей вступает во взаимодействие с веществом. В тех случаях, когда уравнения электродинамики линейны и однородны, результат такого взаимодействия может быть представлен в следующем виде:

$$\mathbf{L}(\mathbf{r}, \hat{\mathbf{I}}) = \tilde{\mathbf{R}}(\hat{\mathbf{I}}' \times \hat{\mathbf{I}}, \hat{\mathbf{N}} \times \hat{\mathbf{I}}) \tilde{\rho}(\mathbf{r}, \hat{\mathbf{I}}, \hat{\mathbf{I}}') \tilde{\mathbf{R}}(\hat{\mathbf{I}}' \times \hat{\mathbf{N}}', \hat{\mathbf{I}}' \times \hat{\mathbf{I}}) \mathbf{L}(\mathbf{r}, \hat{\mathbf{I}}'), \quad (4)$$

где $\tilde{\rho}(\mathbf{r}, \hat{\mathbf{I}}, \hat{\mathbf{I}}')$ – 4×4 матрица Мюллера, которая описывает воздействие вещества на световой пучок; $\tilde{\mathbf{R}}(\hat{\mathbf{I}}' \times \hat{\mathbf{N}}', \hat{\mathbf{I}}' \times \hat{\mathbf{I}})$ – матрица поворота плоскости референции от $\hat{\mathbf{I}}' \times \hat{\mathbf{N}}'$ к $\hat{\mathbf{I}}' \times \hat{\mathbf{I}}$. Плоскость $\hat{\mathbf{I}}' \times \hat{\mathbf{N}}'$ образована направлением луча после *предыдущего* рассеяния и нормалью элемента поверхности, на которой произошло *предыдущее* взаимодействие; $\hat{\mathbf{I}}' \times \hat{\mathbf{I}}$ – направлениями лучей после *предыдущего и текущего* взаимодействия; $\hat{\mathbf{N}} \times \hat{\mathbf{I}}$ – направлением луча после *текущего* взаимодействия и нормалью элемента поверхности, на котором произошло *текущее* взаимодействие.

Результат ряда последовательных преобразований будет получен путём применения соответствующей матрицы $\tilde{\rho}$, которая является произведением матриц частичных преобразований:

$$\tilde{\rho} = \prod \tilde{\mathbf{R}}_i \tilde{\rho}_i \tilde{\mathbf{R}}'_i. \quad (5)$$

В данной работе исследовался лишь случай отражения света от поверхностей сцены с различной долей Френелевской составляющей. Поэтому далее речь ведётся о построении матриц Мюллера, которые описывают изменение вектора Стокса только на границе раздела сред с различным показателем преломления.

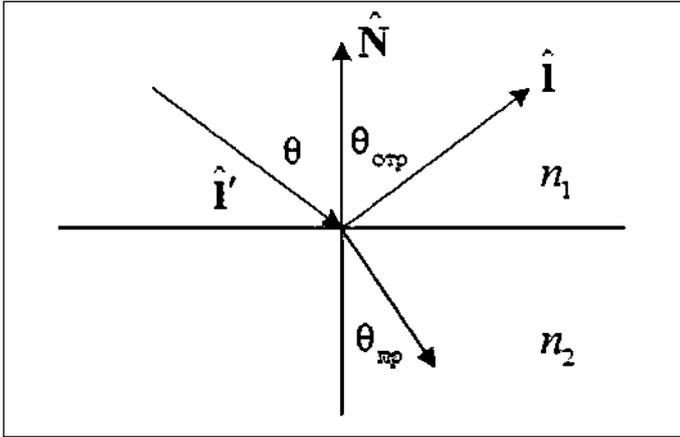


Рис. 1. Ход луча на границе двух сред

Пусть θ – угол падения, то есть угол между направлением $-\hat{\mathbf{I}}'$ и вектором $\hat{\mathbf{N}}$ нормали к поверхности (рис. 1); $\theta_{\text{отр}}$ – угол отражения; $\theta_{\text{пр}}$ – угол преломления.

Направление $\hat{\mathbf{I}}$ луча, отражённого от границы раздела сред, определится как:

$$\hat{\mathbf{I}} = \hat{\mathbf{I}}' - 2(\hat{\mathbf{N}}, \hat{\mathbf{I}}')\hat{\mathbf{N}}. \quad (6)$$

В общем случае при отражении от границы двух диэлектрических сред матрица Мюллера $\vec{\rho}$ имеет следующий вид [13]:

$$\vec{\rho} = \frac{1}{2} \begin{pmatrix} \rho_{\perp} + \rho_{\parallel} & \rho_{\perp} - \rho_{\parallel} & 0 & 0 \\ \rho_{\perp} - \rho_{\parallel} & \rho_{\perp} + \rho_{\parallel} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 2\sqrt{\rho_{\perp}\rho_{\parallel}} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 2\sqrt{\rho_{\perp}\rho_{\parallel}} \end{pmatrix}, \quad (7)$$

где $\rho_{\parallel} = \frac{\text{tg}^2(\theta - \theta_{\text{пр}})}{\text{tg}^2(\theta + \theta_{\text{пр}})}$ – френелевский ко-

эффициент отражения для луча, линейно поляризованно-

го в плоскости падения; $\rho_{\perp} = \frac{\sin^2(\theta - \theta_{\text{пр}})}{\sin^2(\theta + \theta_{\text{пр}})}$ – френелевский

коэффициент отражения для луча, линейно поляризованного перпендикулярно плоскости падения.

При этом отражённая и преломлённая волны сохраняют поляризацию, которая у них была до взаимодействия.

В частом случае нормального падения ($\theta = 0$), когда коэффициент отражения не зависит от поляризации, матрица $\vec{\rho}$ запишется как:

$$\vec{\rho} = \rho \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -1 \end{pmatrix} = \left(\frac{n_1 - n_2}{n_1 + n_2}\right)^2 \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -1 \end{pmatrix}. \quad (8)$$

Для угла Брюстера $\theta = \theta_{\text{Б}}$, при котором $R_{\parallel} = 0$, матрица равна:

$$\vec{\rho} = \frac{1}{2} \cos^2 2\theta_{\text{Б}} \begin{pmatrix} 1 & 1 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}, \quad \text{а}$$

$$\mathbf{L}_{\text{отр}} = \frac{1}{2} (L_0 + L_1) \cos^2 2\theta_{\text{Б}} \begin{pmatrix} 1 \\ 1 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}. \quad (9)$$

Проводя аналогию между яркостью и вектором Стокса (который представляет собой «векторную яркость»), можно получить уравнение глобального освещения с учётом поляризации подобно [14, 5].

С учётом (2) и (4) связь между упавшим и рассеянным излучением определится следующим образом:

$$\mathbf{L}(\mathbf{r}, \hat{\mathbf{I}}) = \frac{1}{\pi} \int \vec{\mathbf{R}}(\hat{\mathbf{I}}' \times \hat{\mathbf{I}}, \hat{\mathbf{N}} \times \hat{\mathbf{I}}) \vec{\rho}(\mathbf{r}, \hat{\mathbf{I}}, \hat{\mathbf{I}}') \vec{\mathbf{R}}(\hat{\mathbf{I}}' \times \hat{\mathbf{N}}, \hat{\mathbf{I}}' \times \hat{\mathbf{I}}) \cdot \mathbf{L}(\mathbf{r}, \hat{\mathbf{I}}') |(\hat{\mathbf{N}}, \hat{\mathbf{I}}')| d\hat{\mathbf{I}}', \quad (10)$$

где $\hat{\mathbf{I}}'$ – единичный вектор направления падения излучения; $\hat{\mathbf{I}}$ – то же для рассеяния; \mathbf{r} – радиус-вектор точки рассеяния; $\mathbf{L}(\mathbf{r}, \hat{\mathbf{I}})$ – вектор Стокса в точке \mathbf{r} по направлению $\hat{\mathbf{I}}$; $\hat{\mathbf{N}}$ – нормаль к поверхности; $\vec{\mathbf{R}}(\hat{\mathbf{I}}' \times \hat{\mathbf{N}}, \hat{\mathbf{I}}' \times \hat{\mathbf{I}})$ – матрица поворота плоскости референции от $\hat{\mathbf{I}}' \times \hat{\mathbf{N}}$ к $\hat{\mathbf{I}}' \times \hat{\mathbf{I}}$; $\vec{\rho}(\mathbf{r}, \hat{\mathbf{I}}, \hat{\mathbf{I}}')$ – матрица Мюллера в точке отражения при заданных направлениях падения и рассеяния излучения.

Условимся, что в среде между поверхностями сцены отсутствует поглощение, рассеяние и преломление. Тогда имеем краевую задачу уравнения переноса излучения (УПИ):

$$(\nabla, \hat{\mathbf{I}}) \mathbf{L}(\mathbf{r}, \hat{\mathbf{I}}) = 0, \quad (11)$$

с граничными условиями на рассеивающих поверхностях:

$$\mathbf{L}(\mathbf{r}, \hat{\mathbf{I}}) = \frac{1}{\pi} \oint \vec{\mathbf{R}}(\hat{\mathbf{I}}' \times \hat{\mathbf{I}}, \hat{\mathbf{N}} \times \hat{\mathbf{I}}) \vec{\rho}(\mathbf{r}, \hat{\mathbf{I}}, \hat{\mathbf{I}}') \cdot \vec{\mathbf{R}}(\hat{\mathbf{I}}' \times \hat{\mathbf{N}}, \hat{\mathbf{I}}' \times \hat{\mathbf{I}}) \mathbf{L}(\mathbf{r}, \hat{\mathbf{I}}') |(\hat{\mathbf{N}}, \hat{\mathbf{I}}')| d\hat{\mathbf{I}}', \quad (12)$$

и на излучающих:

$$\mathbf{L}(\mathbf{r}, \hat{\mathbf{I}}) = \mathbf{L}_0(\mathbf{r}, \hat{\mathbf{I}}). \quad (13)$$

Решив уравнение (1) и перейдя к интегралу по поверхности, получим:

$$\mathbf{L}(\mathbf{r}, \hat{\mathbf{I}}) = \mathbf{L}_0(\mathbf{r}, \hat{\mathbf{I}}) + \frac{1}{\pi} \int \vec{\mathbf{R}}(\hat{\mathbf{I}}' \times \hat{\mathbf{I}}, \hat{\mathbf{N}} \times \hat{\mathbf{I}}) \vec{\rho}(\mathbf{r}, \hat{\mathbf{I}}, \hat{\mathbf{I}}') \cdot \vec{\mathbf{R}}(\hat{\mathbf{I}}' \times \hat{\mathbf{N}}, \hat{\mathbf{I}}' \times \hat{\mathbf{I}}) \mathbf{L}(\mathbf{r}, \hat{\mathbf{I}}') \cdot \frac{|(\hat{\mathbf{N}}, \hat{\mathbf{I}}')(\hat{\mathbf{N}}', \hat{\mathbf{I}}')|}{(\mathbf{r} - \mathbf{r}')^2} d^2\mathbf{r}', \quad (14)$$

где $\hat{\mathbf{N}}' = \hat{\mathbf{N}}(\mathbf{r}') -$ нормаль к поверхности в точке \mathbf{r}' . Интегрирование ведётся по видимой напрямую части поверхности сцены.

Уравнение глобального освещения (УГО) для вектора Стокса примет окончательный вид, если ввести в него функцию видимости $\Theta(\mathbf{r}, \mathbf{r}')$ элемента $d^2\mathbf{r}'$ из точки \mathbf{r} :

$$\begin{aligned} \mathbf{L}(\mathbf{r}, \hat{\mathbf{i}}) = & \mathbf{L}_0(\mathbf{r}, \hat{\mathbf{i}}) + \\ & + \frac{1}{\pi} \int \bar{\mathbf{R}}(\hat{\mathbf{i}}' \times \hat{\mathbf{i}}, \hat{\mathbf{N}} \times \hat{\mathbf{i}}) \bar{\rho}(\mathbf{r}, \hat{\mathbf{i}}, \hat{\mathbf{i}}') \bar{\mathbf{R}}(\hat{\mathbf{i}}' \times \hat{\mathbf{N}}', \hat{\mathbf{i}}' \times \hat{\mathbf{i}}) \cdot \\ & \cdot \mathbf{L}(\mathbf{r}, \hat{\mathbf{i}}') F(\mathbf{r}, \mathbf{r}') \Theta(\mathbf{r}, \mathbf{r}') d^2\mathbf{r}', \end{aligned} \quad (15)$$

$$F(\mathbf{r}, \mathbf{r}') = \frac{|\langle \hat{\mathbf{N}}, \hat{\mathbf{i}}' \rangle \langle \hat{\mathbf{N}}', \hat{\mathbf{i}} \rangle|}{|\mathbf{r} - \mathbf{r}'|^2} = \frac{|\langle \hat{\mathbf{N}}, \mathbf{r} - \mathbf{r}' \rangle \langle \hat{\mathbf{N}}', \mathbf{r} - \mathbf{r}' \rangle|}{|\mathbf{r} - \mathbf{r}'|^4}. \quad (16)$$

3. Решение УГО

Уравнение (2), так же как и стандартное уравнение глобального освещения, полученное в [14, 15], не имеет в общем случае аналитического решения. Поэтому при его решении необходимо использовать численные методы. Наиболее часто для этой цели применяются методы Монте-Карло (ММК). Смысл данного подхода заключается в нахождении решения задачи путём оценки его математического ожидания при помощи моделирования случайных величин.

В рамках данного исследования был разработан ряд программ, которые реализовывали метод прямого моделирования светораспределения без учёта поляризации. В процессе работы этот подход проявил ряд своих известных недостатков, связанных с трудностью формирования сетки и большим потреблением памяти, а потому был признан неэффективным при решении задач моделирования многократных отражений с учётом поляризации.

Для решения УГО с учётом поляризации было предложено использовать локальные оценки метода Монте-Карло. Данный метод впервые был предложен в работе [16] и отличается от методов прямого моделирования тем, что в этом случае оценивается не распределение фотонов сразу по *всем поверхностям* сцены, а вероятность попадания фотонов именно в *интересующие нас точки*. Применительно к рассматриваемой задаче, метод заключается в переходе от интегрирования по *поверхности* к интегрированию по *объёму* путём введения под интеграл δ -функции, что даёт возможность строить моделирование по лучу.

Локальные оценки получили широкое распространение в задачах, связанных с переносом излучения в мутных средах. Если же рассматривать моделирование светораспределения при проектировании осветительных установок, то данный метод стал использоваться относительно недавно и был описан, в частности, в [17]. Там же показано, что локальные оценки позволяют проводить физически адекватное моделирование УГО и дают возможность по одному лучу проводить оценку сразу во всех интересующих точках, что повышает эффективность расчётов в среднем в 80–90 раз (на примере решения задачи Соболева) [17]. В силу этого, использование локальных оценок ММК при расчётах многократных отражений с учётом поляризации представляется тем более перспективным, если учиты-

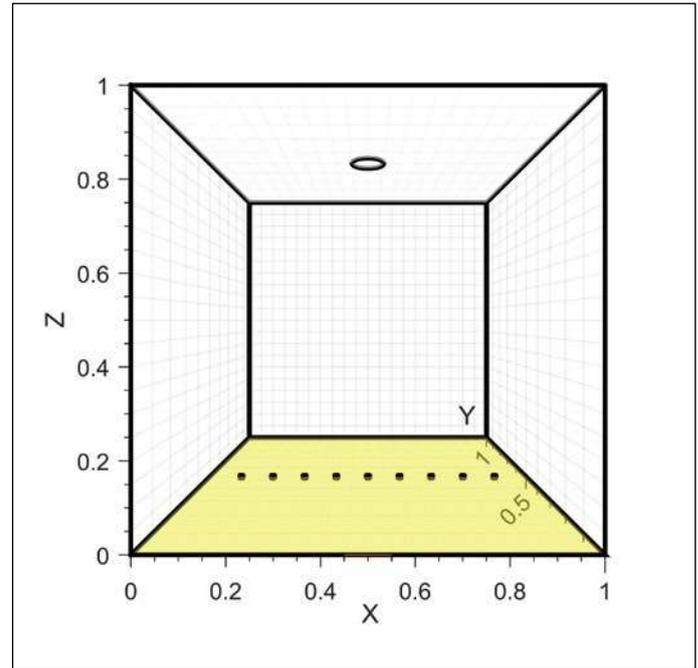


Рис. 2. Сцена для моделирования многократных отражений

вать, что на каждом шаге алгоритма необходимо выполнять большее количество операций по сравнению со стандартным моделированием.

Однако уравнение (2) является неудобным для использования методов статистического моделирования в силу того, что находящаяся под интегралом искомая функция стоит в точке \mathbf{r}' , но определяется в точке \mathbf{r} . Чтобы иметь возможность использовать локальные оценки, необходимо данное уравнение преобразовать. Причём следует учесть, что \mathbf{r}' и $\hat{\mathbf{i}}'$ не являются независимыми и связаны следующим образом:

$$\hat{\mathbf{i}}' = \frac{\mathbf{r} - \mathbf{r}'}{|\mathbf{r} - \mathbf{r}'|}. \quad (17)$$

Тогда уравнение (2) принимает вид:

$$\begin{aligned} \mathbf{L}(\mathbf{r}, \hat{\mathbf{i}}) = & \mathbf{L}_0(\mathbf{r}, \hat{\mathbf{i}}) + \\ & + \frac{1}{\pi} \int \bar{\mathbf{R}}(\hat{\mathbf{i}}' \times \hat{\mathbf{i}}, \hat{\mathbf{N}} \times \hat{\mathbf{i}}) \bar{\rho}(\mathbf{r}, \hat{\mathbf{i}}, \hat{\mathbf{i}}') \bar{\mathbf{R}}(\hat{\mathbf{i}}' \times \\ & \times \hat{\mathbf{N}}', \hat{\mathbf{i}}' \times \hat{\mathbf{i}}) \mathbf{L}(\mathbf{r}, \hat{\mathbf{i}}') \delta(\hat{\mathbf{i}} - \hat{\mathbf{i}}') F(\mathbf{r}, \mathbf{r}') \Theta(\mathbf{r}, \mathbf{r}') d^3\mathbf{r}'. \end{aligned} \quad (18)$$

УГО для вектора Стокса содержит в себе δ -функцию, которая затрудняет моделирование оценками метода Монте-Карло. Эту особенность можно устранить, если проинтегрировать по пространству. В результате оценка примет вид:

$$\mathbf{I}_\varphi = M \sum_{n=0}^{\infty} \bar{\mathbf{k}}(\mathbf{r}, \mathbf{r}') \mathbf{Q}_n \quad \text{или} \quad \begin{pmatrix} I_{\varphi 0} \\ I_{\varphi 1} \\ I_{\varphi 2} \\ I_{\varphi 3} \end{pmatrix} = M \sum_{n=0}^{\infty} \bar{\mathbf{k}}(\mathbf{r}, \mathbf{r}') \begin{pmatrix} Q_{n0} \\ Q_{n1} \\ Q_{n2} \\ Q_{n3} \end{pmatrix}, \quad (19)$$

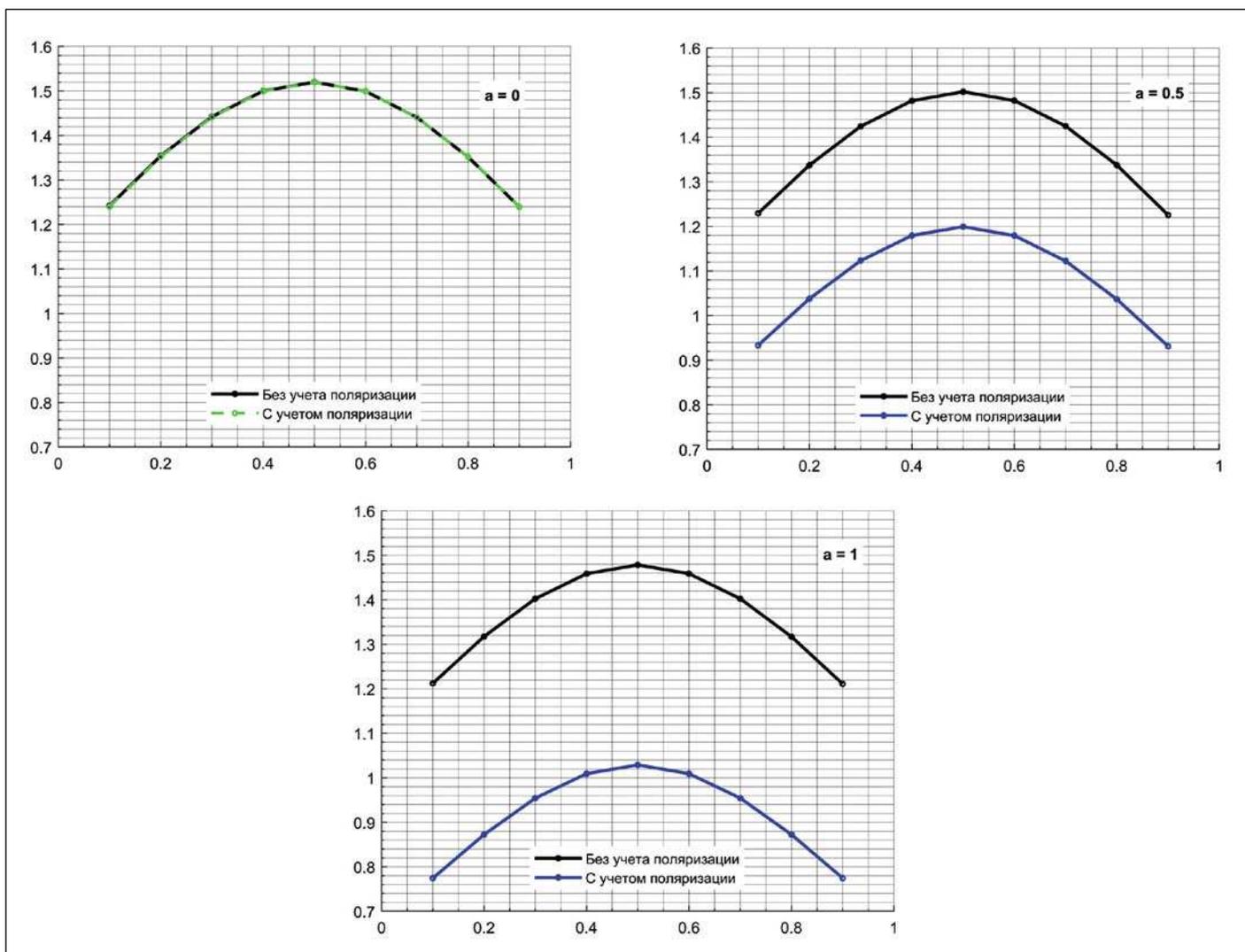


Рис. 3. Распределение освещённости при различных a

$$\begin{aligned} \vec{k}(\mathbf{r}, \mathbf{r}') &= \vec{R}(\hat{\mathbf{l}}' \times \hat{\mathbf{l}}, \hat{\mathbf{N}} \times \hat{\mathbf{l}}) \vec{\rho}(\mathbf{r}, \hat{\mathbf{l}}, \hat{\mathbf{l}}') \\ &\vec{R}(\hat{\mathbf{l}}' \times \hat{\mathbf{N}}', \hat{\mathbf{l}}' \times \hat{\mathbf{l}}) F(\mathbf{r}, \mathbf{r}') \Theta(\mathbf{r}, \mathbf{r}'), \end{aligned} \quad (20)$$

где \mathbf{Q}_n – векторный вес луча, компоненты которого соответствуют компонентам вектора Стокса, M – оператор усреднения.

Выражение (19) носит название локальной оценки метода Монте-Карло и даёт возможность оценивать освещённость в интересующей нас точке \mathbf{r} пространства, в котором моделируются многократные отражения.

4. Реализация математической модели и результаты

Предложенный выше способ решения УГО с учётом поляризации локальными оценками метода Монте-Карло был реализован в среде MATLAB. В качестве сцены для моделирования многократных отражений была выбрана «комната» размерами $1 \times 1 \times 1$, в центре «потолка» которой установлен ламбертовский источник в форме диска радиусом 0,05. На «полу» комнаты расположено девять точек, в которых оценивается освещённость (рис. 2).

В программе при расчётах в качестве матрицы отражения использовалась сумма двух матриц:

$$\vec{\rho} = a \vec{\rho}_f + (1 - a) \vec{\rho}_l, \quad (21)$$

где $\vec{\rho}_f$ – матрица Мюллера (в рассматриваемом случае для френелевского отражения); $\vec{\rho}_l$ – матрица ламбертовского отражения; a – доля френелевского отражения ($0 < a < 1$). Матрица $\vec{\rho}_l$ представляет собой нулевую матрицу с единственным ненулевым элементом $\rho_{l,11}$, который равен коэффициенту отражения.

Остановимся более подробно на численном алгоритме, который использовался в исследовательской программе при моделировании взаимодействия луча с поверхностью. Практическая реализация подхода, описанного выше, представляется нетривиальной задачей из-за появления δ -функции в выражении для индикатрисы в случае френелевского отражения. Её наличие обуславливает невозможность розыгрыша нового направления луча после взаимодействия с френелевской поверхностью и, таким образом, нивелирует эффективность локальных оценок.

Чтобы обойти данное препятствие, используется следующий алгоритм. После попадания луча в поверхность разыгрывается случайный параметр α , равномерно распределённый на интервале $(0, 1)$. Затем, если $\alpha < a$, новое направление луча вычисляется по формуле (6); в про-

тивном случае луч разыгрывается в соответствии с диффузным законом. В соответствии с выбранным вариантом взаимодействия используется френелевская или ламбертовская матрица отражения.

В качестве входных переменных в программу были переданы следующие параметры поверхностей: коэффициент отражения – 0,5, коэффициент преломления – 1,5, параметр a изменялся от 0 до 1. Графики на рис. 3 демонстрируют распределения освещённости на поверхности «пола», полученные с учётом и без учёта поляризации, при различных значениях параметра a .

5. Заключение

Приведённые выше результаты показывают, что учёт поляризации существенно влияет на получаемые при расчётах значения светотехнических параметров. При $a = 0,6$ разница в значениях составляет уже более 20 %, а в предельном случае – более 30 %. Следовательно, учёт поляризации необходим при решении целого ряда светотехнических задач, связанных с моделированием светораспределения.

Необходимо отметить, что описанная выше математическая модель многократных отражений света с учётом поляризации остаётся в рамках стандартных фотометрических понятий, но является обобщением на случай поляризации. Существенным отличием от стандартной модели является то, что яркость из скалярной величины преобразуется в векторную, а коэффициент отражения становится матрицей. Кроме того, появляется необходимость учёта поворота плоскости референции после каждого взаимодействия света с веществом.

Также в результате работы было получено уравнение глобального освещения для случая поляризации. Это даёт возможность использовать прежние методы, которые после определённого изменения будут учитывать состояние поляризации света. Так, было получено выражение для локальной оценки ММК с учётом поляризации. Данный метод представляется на сегодняшний день наиболее перспективным, так как даёт возможность проводить оценку всего по одному лучу сразу во всех интересующих точках сцены и ускоряет вычисления в среднем в 80–90 раз по сравнению с методами прямого моделирования.

В качестве следующих этапов работы в данной области могут быть разработка более полной модели рассеяния света на поверхностях исследуемой сцены и в подповерхностном слое среды, а также её экспериментальная проверка.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Mishchenko M.I., Lacis A.A., Travis L.D.* Errors induced by the neglect of polarization in radiance calculations for Rayleigh-scattering atmospheres // *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer.*– 1994. – Т. 51,– № 3. – С. 491–510.
2. *Wolff L.B., Kurlander D.J.* Ray tracing with polarization parameter // *IEEE Computer Graphics and Applications.*– 1990. – Т. 10.– № 6. – С. 44–55.
3. *Wilkie A., Tobler R., Ulbricht C. et al.* An analytical model for skylight polarization // *Proceedings EGSR.*– 2004. – С. 387–399.

4. *Ghosh A., Chen T., Peers P. et al.* Circularly polarized spherical illumination reflectometry // *ACM Transaction on Graphics.*– 2010. – Т. 29.– № 6. – С. 1–12.

5. *Mojzik M., Skrivan T., Wilkie A., Krivanek J.* Bi-Directional Polarised Light Transport // *Eurographics Symposium on Rendering.*– 2016.

6. *Zhdanov D., Ershov S., Shapiro L., Sokolov V., Voloboy A. et al.* Realistic image synthesis in presence of birefringent media by backward ray tracing technique // *Proc. SPIE10694, Computational Optics II, 106940D* (28 May 2018)

7. *Kozlov D.S., Debelov V.A.* Algorithm for Photorealistic Rendering of Transparent Optically Active Isotropic Crystals // *Programming and Computer Software.*– 2015. – Т. 41.– № 5. – С. 267–272.

8. *Розенберг Г.В.* Луч света // *Успехи физических наук.*– 1977. – Т. 121.– № 1. – С. 97–138.

9. *Анресян Л.А., Кравцов Ю.А.* Теория переноса излучения: статистические и волновые аспекты // *Наука. Главная редакция физико-математической литературы, Москва.*– 1983.– 216 с.

10. *Stokes G.G.* On the composition and resolution of streams of polarized light from different sources // *Transactions of the Cambridge Philosophical Society.*– 1852. – Т. IX. – С. 399.

11. *Розенберг Г.В.* Вектор-параметр Стокса // *Успехи физических наук.*– 1955. – Т. LVI.– № I. – С. 77–110.

12. *Шерклифф У.* Поляризованный свет // *Издательство «Мир», Москва.*– 1965.– 264 с.

13. *Пригарин С.М.* Основы статистического моделирования переноса поляризованного оптического излучения // *Учеб. Пособие, Новосиб. гос. ун-т, Новосибирск.*– 2010.– 109 с.

14. *Будак В.П.* Визуализация распределения яркости в трёхмерных сценах наблюдения // *Издательство МЭИ, Москва.*– 2000.– 136 с.

15. *Kajiya J.T.* The rendering equation // *In Proceedings of SIGGRAPH.*– 1986. – Т. 20.– № 4. – С. 143–150.

16. *Kalos M.H.* On the Estimation of Flux at a Point by Monte Carlo // *Nuclear Science and Engineering.*– 1963. – Т. 16.– № 1. – С. 111–117.

17. *Будак В.П., Желтов В.С., Калатуцкий Т.К.* Локальные оценки метода Монте-Карло в решении уравнения глобального освещения с учётом спектрального представления объектов // *Компьютерные исследования и моделирование.*– 2012. – Т. 4.– № 1. – С. 75–84.



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



Гримайло Антон Валентинович, студент магистратуры НИУ «МЭИ» (кафедра «Светотехника»)

Международная научно-практическая конференция по применению светодиодных фитооблучателей

С 9 по 10 сентября в г. Москве прошла Международная научно-техническая конференция по применению светодиодных фитооблучателей. Конференция, организованная Всесоюзным научно-исследовательским светотехническим институтом имени Вавилова при поддержке Министерства науки и высшего образования, собрала более 280 учёных-светотехников, светофизиологов и биологов из 13 стран: России, Германии, Японии, Швейцарии, Литвы и других.

Партнёрами конференции выступили Международная комиссия по освещению, Международная электротехническая комиссия, МГУ имени Ломоносова, Тимирязевская академия, Международная светотехническая корпорация «БЛ Групп», выставка *Interlight Russia | Intelligent building Russia*, а также общественные организации – Отраслевой научно-технический совет «Светотехника» и Ассоциация «Теплицы России».

Модераторами конференции выступили президент МСК «БЛ Групп», председатель НТС «Светотехника» Георгий Валентинович Боос, заведующий лабораторией ВНИСИ Леонид Борисович Прикупец, главный редактор журнала «Светотехника / *Light & Engineering*» В.П. Будак и директор Ботанического сада МГУ Владимир Викторович Чуб.

Поздравляли присутствующих с началом работы и почётные гости: конференции Питер Блаттнер, *Ph.D.*, президент Международной комиссии по освещению (МЭК), Андреас Шольц, руководитель ТК 34 (группа AG15 по тепличному освещению МЭК), руководитель бюро по стандартизации компании *Osram*, Владимир Павлович Будак, д.т.н., профессор, главный редактор журналов «Светотехника / *Light&Engineering*» и Антон Павлович Шалаев, заместитель руководителя Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии.

Спикеры конференции – эксперты в области светокультуры растений – в своих выступлениях представили весь спектр актуальных вопросов использования искусственного освещения в сооружениях защищённого грунта.

В ходе конференции состоялись два секционных заседания и открытое заседание НТС «Светотехника», посвящённое тематике научно-практических во-

просов применения светодиодных фитооблучателей и комплексного анализа имеющегося опыта российских и зарубежных компаний по использованию светодиодов в сооружениях защищённого грунта.

Открыл конференцию в первый день её работы доклад «Светодиоды в тепличном освещении: возможности и реальность» Леонида Борисовича Прикупца, к.т.н., заведующего лабораторией ВНИСИ им. С.И. Вавилова. Он отметил, что применение светодиодов в освещении теплиц уверенно растёт и уже занимает четвёртое место по количественному применению новых источников света.

Так количество облучателей с НЛВД в теплицах России с 2010 года по 2019 год выросло со 750 т. шт. до 2 миллионов, а количество облучателей со светодиодами с 2016 года до настоящего времени выросло практически с нуля до 400 тысяч. При этом общая площадь теплиц составляет 25 тысяч квадратных километров, что пока ещё недостаточно для обеспечения населения тепличными овощами и фруктами...

Автор доклада обозначил четыре стадии внедрения светодиодов в освещение теплиц: ФБИ с целью оптимизации требований к спектру и уровню облучённости; разработка эффективных фитооблучателей; пилотные проекты в теплицах, разработка оптимальных СД технологий, достижение устойчивых экономических эффектов; массовое вне-

дрение СД в теплицы с использованием цифровых технологий управления и регулирования; интеграция СД освещения в глобальные системы управления и роботизации.

Докладчик представил обзор совместных фотобиологических исследований ВНИСИ и РГАУ-МСХА им. К.А. Тимирязева, в процессе которых изучалось влияние излучения в различных диапазонах ФАР на продуктивность салатно-зеленных культур.

Л.Б. Прикупец отметил, что с декабря 2017 г. действуют 2 стандарта по вопросам измерения светодиодных фитооблучателей (ГОСТ Р 57671–2017) и облучательных установок на их основе в теплицах (ПНСТ 211–2017), разработанные ВНИСИ при поддержке Фонда инфраструктурных и образовательных программ Группы РОСНАНО, введена в практику новая система фотосинтетических фотонных величин. Кроме того, в настоящее время в Росстандарте находится на утверждении проекта стандарта ГОСТ РФ «Освещение растений в сооружениях защищённого грунта. Термины и определения».

С докладом «Измерения и параметры освещения в сельском хозяйстве» выступил Питер Блаттнер, президент Международной комиссии по освещению.

Учитывая специфику отрасли, далеко не все светильники в состоянии справиться с поставленной задачей и обеспечить нормальное функционирование в условиях агрессивной среды. Светильники на светодиодных источниках света сегодня являются наилучшим выбором для сельскохозяйственных предприятий, которые в состоянии решить проблему освещения без значительных энергетических затрат.



П. Блатнер также отметил, что спектральные потребности растений могут варьироваться в процессе выращивания, поэтому необходимо разрабатывать излучатели с настраиваемым спектром, а такие возможности предоставляют светодиодные источники света.

Касаясь Метрической конвенции, он сообщил, сегодня в её работу включено 56 государств-членов и 39 ассоциированных членов. В мае этого года было подписано Соглашение CIPM-MRA о взаимном признании между участниками пересмотренной международной системы единиц (СИ).

«Тепличное освещение в МЭК / ТК 34 – Электротехнический подход в биологии» – тема доклада Андреаса Шольца, руководителя ТК 34 (группа AG15 по тепличному освещению МЭК). Он рассказал о работе бюро по стандартизации, который в основном занимается разработкой и согласованием стандартов в области электротехники, в том числе и освещения. Членами бюро являются 34 страны, 17 стран наблюдателей, 98 экспертов. Три экспертные команды по освещению выпустили 563 публикации, сегодня ведётся работа над 53 проектами: по синему свету, по безопасности ИС светодиодного освещения и др. Основной целью работы является объединение всех этих проектов в единый стандарт.

Владимир Викторович Чуб, д.б.н., профессор кафедры физиологии растений биологического факультета МГУ, директор Ботанического сада МГУ свой доклад «Поглощение света растениями и биологически активные молекулы» посвятил биологическому механизму поглощения растениями различных спектров света и тому, как происходит фотосинтез в различных видах растений. В том числе, отмечалось, что фоторецепторы контролируют открытие устьиц, синтез пигментов, фототропизм, избегание тени, сроки цветения, суточную ритмичность и другие процессы.

Также в рамках первого дня конференции прозвучали доклады:

– «Влияние дополнительного освещения на фотосинтез культур: лабораторные эксперименты по физиологическим аспектам», представленный Рю Матсудой, профессором Кафедры биологической и экологической инженерии Высшей школы сельскохозяйственных наук Токийского университета, Япония;

– «Концептуальные подходы к выбору спектра излучения ламп для выращивания растений в искусственных условиях» – доклад Александра Аполлинарьевича Тихомирова, д.б.н., профессора из

Института биофизики Сибирского отделения РАН;

– Хайке Мемпель, профессор университета прикладных наук *Weihenstephan Triesdorf* из Германии прочитала доклад «Потенциал использования искусственного освещения в растениеводстве»;

– «Некоторые пути оптимизации светодиодного освещения в светокультуре растений» – тема выступления Юлия Александровича Берковича, д.т.н., профессора, Государственного научного центра РФ – Института Медико-биологических проблем РАН;

– Доклад «Светодиоды в сельском хозяйстве: концепция развития в фотофизиологии» представила Гьедре Самуольене, руководитель лаборатории физиологии растений; заместитель директора по исследованиям в Литовском научно-исследовательском центре сельского и лесного хозяйства, Сельскохозяйственный Институт;

– «Метрологическое обеспечение светодиодного освещения: от фотометрии к «фитометрии» – Андрей Сергеевич Батулин, к.ф.-м.н., директор ФГУП «ВНИИОФИ», Россия;

– «Светокультура растений 2.0» Иван Германович Тараканов, д.б.н., профессор Российского Государственного Аграрного Университета – МСХА им. К.А. Тимирязева, заведующий кафедрой физиологии растений, Россия;

– Завершился первый день работы конференции экскурсией в «Аптекарский огород» МГУ им. М.В. Ломоносова.

Во второй день работы конференции в её рамках под председательством Г.В. Бооса прошло расширенное заседание Научно-технического совета светотехнической отрасли по теме «Актуальные проблемы освещения при светокультуре растений» и прозвучали следующие доклады:

– «Международная сертификация светодиодных светильников: система оценки качества электронных компонентов» Антуанетты Пителю, сотрудника Международного отдела Международной электротехнической комиссии МЭК, Швейцария;

– «Системы оценки соответствия Международной электротехнической комиссии и преимущества участия в них» Николая Исаковича Файзрахманова, председателя Технического комитета по стандартизации 030 «Электромагнитная совместимость технических средств», члена Совета по оценке соответствия МЭК, Россия;

– «Состояние и перспективы развития тепличной отрасли России», На-

тали Дмитриевны Роговой, генерального директора ассоциации «Теплицы России»;

– «Интеллектуальный программно-аппаратный комплекс управления системой технологического освещения сельскохозяйственных культур, выращиваемых в условиях закрытого грунта», Константина Абрамовича Томского, д.т.н., генерального директора научно-технического предприятия «ТКА», Россия.

С полным перечнем докладов можно ознакомиться на сайте ВНИСИ, кроме того, видеозапись каждого из выступлений доступна на YouTube-канале ВНИСИ.

В резолюции конференции были отмечены:

– эффективность мер государственной поддержки исследований и разработок в области светотехники для светокультуры растений и необходимость их дальнейшего продолжения для обеспечения прогресса в указанной области;

– в целях развития современных технологий применения светодиодного искусственного освещения для выращивания растений необходимо дальнейшее обсуждение указанных вопросов, в рамках работы Научно-технического совета светотехнической отрасли России, Международной электротехнической комиссии и Международной комиссии по освещению;

– необходимость более тесного взаимодействия профессионального сообщества светотехников и специалистов аграрного сектора – учёных, производителей, представителей бизнес-сообщества, с целью решения задач технологического освещения растений с учётом фотобиологической безопасности для человека, повышения эффективности внедряемых светодиодных систем освещения и сокращения сроков их окупаемости.

Высокий уровень представленных докладов, участие ведущих российских и иностранных экспертов, широкий отклик специалистов отрасли – всё это позволяет считать конференцию уникальным и значимым событием как для российской светотехники, так и для мирового профессионального общества в целом.

*Корреспондент журнала
«Светотехника»
Е.С. Серый
Руководитель группы ВНИСИ
П.А. Федорищев*

Заседание редколлегии журнала «Светотехника»

Накануне выставки *Interlight Russia | Intelligent building Russia* 9 сентября 2019 года было проведено заседание редколлегии журнала «Светотехника» в зале заседания в здании ВНИСИ. На заседании присутствовали 17 членов редколлегии, отсутствовали Богданов А.А., Быстрянцева Н.В., Железнякова О.Е., Зак П.П.

Были представлены новые члены редколлегии Рябцева Алла Алексеевна, доктор медицинских наук, профессор, руководитель офтальмологического отделения МОНИКИ и Мельников Дмитрий Александрович, ведущий специалист Минэнерго.

Первым был заслушан доклад главного редактора журнала Будака Владимира Павло-



тотехнике» (4-е изд.). В книге подведены итоги революционных изменений в светотехнической науке и практике за последние два десятилетия XXI века. В настоящее время книга находится в стадии реализации.

2. Опубликовано четыре крупных обзора, заказанных редакцией известным зарубежным и российским специалистам Даруле С., Кохановскому А.А., Торнзу П. и Апресяну Л.А.

3. Проведена большая дискуссия на современную тему о световом дизайне (16 статей). Дискуссию на эту тему предполагается продолжить и в новом году. Также готовится к изданию два специальных выпуска журнала «Светотехника». Первый, посвященный проблеме светокультуре растений защищенного грунта, выйдет в IV квартале 2019 г., а второй – о новом в освещении музеев – в I квартале 2020 г.

4. Увеличено число выпусков журнала «*Light & Engineering*» с 4 до 6, а общее количество журналов до 12, т.е. ежемесячно.

Выпущен журнал «Светотехника» для детей и их родителей № 2, и будет продолжен в новом году.

Далее выступил шеф-редактор Айзенберг Юлиан Борисович.



вича об итогах работы журнала за II полугодие 2018 г. и I полугодие 2019 г.

1. В целом, истекший период, характеризуется рядом важных достижений журнала. Силами редакции под общим руководством Айзенберга Ю.Б., в которой в качестве авторов участвовало 53 специалиста из 4 городов, проведена большая работа по подготовке и изданию «Справочной книги по све-





1. Не останавливаясь на результатах работы по «Справочной книге по светотехнике», Юлиан Борисович отметил большой вклад работников редакции журнала и ряда членов редколлегии, а также авторов Будака В.П., Столяревской Р.И., Коробко А.А., Новаковского Л.Г., Овчарова А.Т., Закгейма А.Л. и Букатова А.С.

2. Огромное значение для будущего журнала имеет два важных направления работы:

а) Концентрация сил на развитие выпуска журнала для детей, учителей физики и директоров школ с учётом потенциала большого тиража этого журнала, который может укрепить финансовую основу нашей общей журнальной системы. К сожалению, надежда на достаточно быстрое распространение тиража английской версии журнала «*Light & Engineering*» не оправдалась, в первую очередь с политикой экономической ситуацией в мире и жёсткой конкуренцией англоязычными, немецкоязычными и японскими изданиями светотехнических журналов.



б) Представляется исключительно перспективным созданием при журнале отдела по подготовке и изданию учебной литературы. В этом направлении уже проведены подготовительные работы, которые направлены на подготовку списка первоочередных учебников (выпуск 2020–2021 годы) и технических требований к учебным пособиям по специальности «Светотехника». Остальные важные моменты находятся в стадии рассмотрения.

3. Мы планируем в следующем году провести интервью с зарубежными и российскими

специалистами и продолжению заказа ведущим специалистам обзорных статей.

Для дальнейшего развития журнала необходимо кадровое усиление редакции и более активное участие членов редколлегии.



Выступление Генерального директора редакции Шерри Наталии Сергеевны было посвящено конкретным вопросам развития выпуска журнала «Светотехника» для детей и их родителей, прежде всего плану перспективных публикаций, решению вопроса об иллюстрировании журнала без успешного решения, которого журнал выпускать практически не возможно, подготовке и утверждению постоянного состава редколлегии этого журнала.

Было проведено обсуждение докладов, в рамках которого выступили Столяревская Р.И., Томский К.А., Щепетков Н.И., Коробко А.А., Соловьёв А.К.

Редколлегия одобрила проведение последующих заседаний за день до выставки в здании ВНИСИ.

Зав. редакцией Титаренко М.И.

Светотехническое общество России: от учредительного съезда советских светотехников до первой интернет-конференции



В начале 1990-х гг. наша страна вошла в непростое время перемен во всех сферах жизни общества, и связанные с этим преобразования не обошли стороной и светотехнику, потребовав от светотехнической общественности большей консолидации и ответственности, поиска новых форм и методов работы и сотрудничества, общепринятых для стран с рыночной экономикой. Именно поэтому в 1991 г. по инициативе ВНИСИ им. С.И. Вавилова началась работа по созданию новой общественной организации светотехников – Всесоюзного светотехнического общества. Инициатива получила широкую поддержку учёных и инженеров, работающих в светотехнике и в связанных с ней областях науки, техники, культуры и образования.

После серьёзной и длительной подготовительной работы 24–25 сентября 1991 г. в Москве состоялся Учредительный съезд Светотехнического общества, в котором приняли участие 84 делегата из 29 научных, производственных, учебных и общественных организаций России, Украины, Белоруссии, Таджикистана, Армении, Латвии и Эстонии.

Этот поистине исторический съезд принял решение о создании Общества как автономной части ВНТОЭ¹, утвердил его Устав и избрал Президентом Г.Р. Шахпарунянца (ВНИСИ). Вице-президентами были избраны Ю.Б. Айзенберг (ВНИСИ), А.М. Кокинов (ВНИИИС) и А.Б. Матвеев (МЭИ). Исполнительным вице-президентом была утверждена М.Ю. Каплинская (ВНИСИ), которую позже

на этом посту сменил Л.Б. Прикупец (ВНИСИ).

Непосредственно на съезде заявление о вступлении в Общество в качестве коллективных членов подали 18 организаций. Светотехническое общество, представляющее собой «независимую творческую самоуправляемую общественную организацию» создавалось как Всесоюзное объединение, однако события по распаду СССР развивались стремительно: уже 8 декабря 1991 г. главами государств России, Украины и Беларуси было подписано Беловежское соглашение, которое объявляло о прекращении существования Советского Союза и создании Содружества Независимых Государств. Поэтому Министерство юстиции РФ одним из последних своих актов № 526 от 27.12.91 зарегистрировало вновь созданную организацию светотехников как Межрегиональное общественное объединение «Светотехническое общество».

Основной целью Общества стало дальнейшее развитие светотехники, проведение исследований и разработок и внедрение научно-технических и практических достижений на основе консолидации и повышения творческой активности её членов.

23 октября 1991 г. в ходе заседания Президиума правления Светотехнического общества были сформированы 24 комитета для научно-технической работы по главным направлениям светотехники, председа-

¹ Всесоюзное научно-техническое общество энергетиков и электротехников



Пленарное заседание VI Международной светотехнической конференции 2006 г.

телями которых были избраны ведущие профессионалы отрасли.

Несмотря на непростое, переломное для нашей страны время, намеченные съездом планы работ на 1991 и 1992 гг., были выполнены. Так, в плане работ на 1992 г. предусматривалась подготовка к проведению Всесоюзной светотехнической конференции 1993 года. И она состоялась, и более того, прошла с огромным успехом как I Международная светотехническая конференция (14–21 июня 1993 г.) в Санкт-Петербурге, положив начало прекрасной традиции проведения масштабных светотехнических конференций Светотехнического общества.

За почти 20 лет своего существования до 2009 г. Светотехническое общество подготовило и провело целый ряд Международных и национальных светотехнических конференций, значение которых невозможно переоценить. Начиная с конференции в Санкт-Петербурге 1993 года и до первой в России светотехнической интернет-конференции 2009 года конференции давали высококвалифицированные оценки пройденным светотехникой «отрезкам пути», выявляя наиболее перспективные направления развития отрасли.

II Конференция была проведена 22–27 мая 1995 г. в Суздале под девизом «Комфортное, энергоэкономичное и экологичное освещение». Общее число её участников составило 180 человек, среди которых была большая группа иностранных специалистов (из восьми стран), большая часть которых как бы «открыла» для себя российскую светотехнику. В Суздале состоялось отчётно-выборное собрание Светотехнического об-

щества, на котором его президентом на очередной срок был повторно избран Г.Р. Шапарунянц.

III Международная светотехническая конференция состоялась 9–11 июня 1997 г. в Великом Новгороде. В её работе приняли участие 165 специалистов из восьми стран и из двадцати российских городов. Конференция поставила ряд задач перед Обществом: развитие пропаганды энергоэффективных и экономичных светотехнических изделий, содействие установлению новых научно-технических связей между различными предприятиями и фирмами, расширение научно-технических контактов на международном уровне, объединение усилий рыночных структур для создания в России цивилизованного и развивающегося рынка светотехнических изделий.

19–21 июня 2000 г. в Вологде прошла IV Международная светотехническая конференция под девизом «Светотехника на рубеже веков – достижения и перспективы». Конференция вызвала большой интерес, привлекла 210 участников из восьми стран и 28 российских городов. В сборнике трудов конференции были опубликованы тезисы 175 докладов российских и зарубежных авторов. Свидетельством высокого международного авторитета российской светотехники явилось участие в конференции Президента МКО профессора Х.А. Лефберга (Швеция) и Генерального секретаря МКО К. Херман (Австрия).

2–4 сентября 2003 г. в Санкт-Петербурге прошла V Международная светотехническая конференция, в которой нельзя было не отметить богатство как научной, так и культурной программ. В выступлении

як много внимания уделялось практическому применению светотехнической продукции, выпускаемой отечественными и зарубежными производителями, были широко освещены вопросы энергосбережения и экологической безопасности.

19–21 сентября в Калининграде проходила VI Международная светотехническая конференция с участием специалистов России, Австрии, Белоруссии, Бельгии, Болгарии, Германии, Индии, Италии, Нидерландов, Польши, Турции, Украины и Финляндии. Конференция в Калининграде, которая явилась последней очной светотехнической конференцией, проведённой Обществом, стала наиболее масштабной и интересной с точки зрения разнообразия и ценности докладов. После процедуры предварительного рецензирования оргкомитет включил в программу конференции 204 доклада российских и зарубежных авторов, тезисы которых были опубликованы в сборнике трудов конференции. Конференция стала крупнейшим на тот момент национальным светотехническим форумом, в программу которого вошли не только пленарные, секционные и постерные сессии, но и круглые столы по практике освещения и экспресс-выставка светотехнических инноваций.

Последним крупномасштабным событием, организованным Обществом, стала Светотехническая интернет-конференция «Свет без границ». VII Международная конференция, проведение которой было запланировано на апрель 2009 г. в Хабаровске, в связи с возникшими трудностями организации, вызванными глобальным экономическим кри-

зисом, была проведена в интернет-формате, став первой в истории нашей страны светотехнической интернет-конференцией.

На конференции было представлено 221 доклад, участие в конференции приняли 228 человек из России, Украины, Белоруссии, Нидерландов, Болгарии, Бельгии, Германии, Финляндии, Турции, Индии, Швеции, Италии и Австрии.

Следует подчеркнуть, что проведение конференции стало возможным благодаря большой помощи и поддержке губернатора Калининградской области Г.В. Бооса и генерального спонсора мероприятия – компании «Светосервис».

Нельзя не отметить и ту большую организационную работу по обеспечению деятельности Общества, которую проводили в 1995-2009 гг. на общественных началах Вице-президент Об-

щества, заведующий лабораторией ВНИСИ Л.Б. Прикупец и ряд сотрудников института – Е.Н. Чернышова, Г.В. Федюкина, И.С. Перова, И.Я. Каинсон, Т.Я. Машковская и другие.

В 2009 г. Светотехническое общество прекратило свою работу. Достигнуты ли были цели, поставленные перед его участниками на первом – учредительном – съезде в далёком 1991 году? Пожалуй, обществу удалось многое, и главное из этого – объединить, консолидировать профессиональное сообщество в условиях тяжёлого переходного периода, когда многие светотехнические организации – прежде всего, научные, конструкторские и производственные – были на грани исчезновения вместе с привычным для советского учреждения укладом

жизни. Расширение контактов с зарубежными коллегами благодаря деятельности Светотехнического общества явилось благотворным бальзамом для активной кооперации и совместных работ, обмена информацией, статьями, достижениями науки и техники. Стоит признать, что совместные усилия всех участников Светотехнического общества позволили светотехникам молодой России сохранить и приумножить знания, опыт и достижения советской светотехники, построив прочный фундамент для сегодняшней светотехнической отрасли нашей страны.

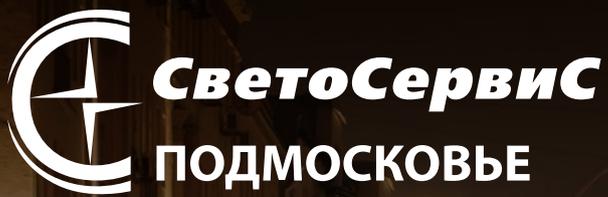
*Е.А. Лесман, инженер-энергетик,
корреспондент журнала
«Светотехника» в Санкт-Петербурге,
участник съезда 1991 г.*

*П.А. Федорищев, руководитель
группы ВНИСИ*

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

ПОДМОСКОВЬЕ

инновационные решения в освещении для столицы и регионов



- **Проектирование**
- **Монтаж**
- **Обслуживание**
- **Управление системами функционального, архитектурного и ландшафтного освещения**



ООО «СветоСервис - Подмосковьё»
129626, Москва,
1-й Рижский пер., 6



svetoservis.ru



+7 (495) 786-85-82

**Оформить подписку или купить статью Вы можете на сайте журнала
«Светотехника / Light & Engineering»
www.l-e-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@l-e-journal.com